



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS GENÉTICOS
VEGETAIS**

TIFFANY DA SILVA RIBEIRO

**ANÁLISE DE TRILHA E ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS
GENÉTICOS PARA ANTOCIANINA E LICOPENO EM
PROGÊNIES DE GOIABEIRA (*Psidium guajava*)**

TIFFANY DA SILVA RIBEIRO

**ANÁLISE DE TRILHA E ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS
GENÉTICOS PARA ANTOCIANINA E LICOPENO EM PROGÊNIES DE
GOIABEIRA (*Psidium guajava*)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, da Universidade Estadual de Feira de Santana como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Recursos Genéticos Vegetais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio Fernandes Santos
Coorientador: Dr. Sérgio Tonetto de Freitas

Feira de Santana – BA

2026

Ficha Catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteadó - UEFS

R372

Ribeiro, Tiffany da Silva

Análise de trilha e estimativas de parâmetros genéticos para antocianina e licopeno em progênies de goiabeira (*Psidium guajava*) / Tiffany da Silva Ribeiro. – 2026.

83 f.: il.

Orientador: Carlos Antonio Fernandes Santos

Coorientador: Sérgio Tonetto de Freitas

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, Feira de Santana, 2026.

1.Fruticultura. 2.*Psidium guajava*. 3.Melhoramento genético.
4.Herdabilidade. 5.Repetibilidade. 6.Correlação fenotípica. I. Santos, Carlos Antonio Fernandes, orient. II. Freitas, Sérgio Tonetto de, coorient.
III. Universidade Estadual de Feira de Santana. IV. Título.

CDU 634.42

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

JOAO CLAUDIO VILVERT

Data: 12/03/2026 16:12:51-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Dr João Claudio Vilvert (Embrapa Semiárido)



Documento assinado digitalmente

LUIZ CLAUDIO COSTA SILVA

Data: 12/03/2026 15:32:35-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Cláudio Costa Silva (Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS)



Documento assinado digitalmente

CARLOS ANTONIO FERNANDES SANTOS

Data: 12/03/2026 15:27:50-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

**Prof. Dr. Carlos Antonio Fernandes Santos (Embrapa Semiárido/CPATSA) Orientador e
Presidente da Banca**

Feira de Santana – BA

2026

Dedico a minha mãe, Juscineide da Silva Ribeiro

AGRADECIMENTOS

Expresso minha sincera gratidão aos meus orientadores e professores da UEFS, pelo conhecimento compartilhado e pela contribuição fundamental ao desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço, de forma especial, aos meus pais e às minhas irmãs, pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo constantes ao longo de toda a trajetória acadêmica.

Estendo meus agradecimentos à minha psicóloga, pelo suporte emocional e pelas orientações que foram essenciais para o equilíbrio e amadurecimento pessoal durante esse período.

Aos amigos da Embrapa, agradeço pelas parcerias, aprendizados e convivência diária, que enriqueceram significativamente esta caminhada.

Agradeço aos amigos externos à instituição, pela amizade, apoio e encorajamento contínuo sou profundamente grata pela confiança depositada em meu potencial e pelo incentivo permanente na busca por crescimento pessoal e profissional, que foram determinantes para a concretização deste trabalho.

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001"

*“A educação é a arma mais poderosa que você pode
usar para mudar o mundo”*

(Nelson Mandela)

RESUMO

A goiabeira apresenta ampla variabilidade na coloração da polpa, resultante do acúmulo diferencial de carotenoides e antocianinas. Este estudo avaliou progênies dos cruzamentos ‘Paluma’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PR), ‘Pedro Sato’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PSR) e ‘Pedro Sato’ × ‘Paluma’ (PSP), visando estimar parâmetros genéticos, correlações e efeitos diretos associados aos teores de licopeno e antocianinas na polpa dos frutos. O experimento foi conduzido na Embrapa Semiárido, envolvendo 225 progênies para licopeno e 152 progênies para antocianinas, avaliadas ao longo de três safras, juntamente com atributos físicos e químicos dos frutos. As estimativas de variância e herdabilidade revelaram ampla diversidade genética e alto controle genético para o licopeno. A repetibilidade indicou estabilidade temporal dos pigmentos, apoiando a seleção precoce. As correlações fenotípicas mostraram associação positiva entre licopeno e β -caroteno, e correlações negativas entre licopeno, sólidos solúveis e vitamina C, sugerindo divergência metabólica entre compostos lipofílicos e hidrossolúveis. As antocianinas apresentaram correlações majoritariamente negativas com características estruturais do fruto, sobretudo nos cruzamentos com ‘Goiabeira Roxa’. Segregantes transgressivos para licopeno (6,12 mg 100 g⁻¹) e antocianinas (26,75 mg 100 g⁻¹) evidenciaram alto potencial de seleção. A análise de trilha identificou o β -caroteno como principal determinante direto do licopeno e demonstrou que atributos estruturais influenciam diretamente as antocianinas, enquanto sólidos solúveis e vitamina C tiveram efeitos pouco consistentes. Os resultados confirmam variabilidade genética relevante e identificam características auxiliares para seleção indireta, reforçando o potencial para desenvolvimento de cultivares com maior teor de pigmentos bioativos e valor funcional.

Palavras-chave: *Psidium guajava*; herdabilidade; repetibilidade; correlação fenotípica.

ABSTRACT

Guava trees exhibit high variability in pulp color, resulting from the differential accumulation of carotenoids and anthocyanins. This study evaluated progenies from the crosses ‘Paluma’ × ‘Purple Guava’ (PR), ‘Pedro Sato’ × ‘Purple Guava’ (PSR), and ‘Pedro Sato’ × ‘Paluma’ (PSP), aiming to estimate genetic parameters, correlations, and direct effects associated with lycopene and anthocyanin content in fruit pulp. The experiment was conducted at Embrapa Semiárido, involving 225 progenies for lycopene and 152 progenies for anthocyanins, evaluated over three growing seasons, along with physical and chemical attributes of the fruits. Variance and heritability estimates revealed high genetic diversity and genetic control for lycopene. Repeatability indicated temporal stability of the pigments, supporting early selection. Phenotypic correlations showed a positive association between lycopene and β -carotene, and negative correlations between lycopene, soluble solids, and vitamin C, suggesting metabolic divergence between lipophilic and water-soluble compounds. Anthocyanins showed predominantly negative correlations with structural characteristics of the fruit, especially in crosses with ‘Purple Guava’. Transgressive segregants for lycopene ($6.12 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) and anthocyanins ($26.75 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) showed high selection potential. Path analysis identified β -carotene as the main direct determinant of lycopene and demonstrated that structural attributes directly influence anthocyanins, while soluble solids and vitamin C had inconsistent effects. The results confirm relevant genetic variability and identify auxiliary traits for indirect selection, reinforcing the potential for developing cultivars with higher levels of bioactive pigments and functional value.

Keywords: *Psidium guajava*; heritability; repeatability; phenotypic correlation.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	12
REFERENCIAL TEÓRICO	13
A cultura da goiabeira.....	13
Pigmentos vegetais em frutos tropicais	15
Antocianinas e carotenoides na goiabeira.....	16
Antocianinas.....	17
Carotenoides.....	20
Métodos de quantificação de antocianinas e carotenoides.....	24
Método de antocianinas	24
Método de carotenoides	25
Herdabilidade	26
Repetibilidade	27
Métodos de estimação de parâmetros genéticos	29
Correlações e análise de trilha	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
CAPÍTULO 1.....	47
PARÂMETROS GENÉTICOS E IDENTIFICAÇÃO DA SEGREGAÇÃO TRANSGRESSIVA PARA OS TEORES DE LICOPENO E ANTOCIANINA EM FRUTOS DE CRUZAMENTOS DE GOIABA (<i>Psidium guajava</i>)	47
1 INTRODUÇÃO	50
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	51
Material vegetal.....	51
Análises do teor de licopeno em frutos de goiaba.....	52
Análises do teor de antocianinas em frutos de goiaba.....	52
Análises estatísticas dos teores de licopeno e antocianina.....	53
Resultados.....	53
Análises do teor de licopeno em frutos de goiaba.....	53
Análises do teor de licopeno em frutos de goiaba.....	55
Estimativas de repetibilidade para licopeno e antocianina	56
Estimativas de herdabilidade em sentido amplo para licopeno e antocianina	56
Discussão	57

Conclusões.....	59
REFERÊNCIA.....	59
CAPÍTULO 2.....	63
ESTIMATIVAS DE CORRELAÇÕES E ANÁLISES DE TRILHA PARA ANTOCIANINAS E LICOPENO EM POPULAÇÕES DE GOIABEIRA.....	63
1 INTRODUÇÃO	66
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	67
2.1 Material vegetal e análises físico-químicas.....	67
2.2 Análises estatísticas.....	69
3 RESULTADOS.....	69
3.1 Análises de correlações em três populações segregantes de goiabeira	69
3.2 Análises de trilha em três populações segregantes de goiabeira	73
4 DISCUSSÃO	76
5 CONCLUSÃO	77
REFERÊNCIAS.....	78
CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
APÊNDICES	82
APÊNDICE A.....	82
APÊNDICE B	83

INTRODUÇÃO GERAL

A goiabeira (*Psidium guajava* L.), pertence à família Myrtaceae, é uma árvore frutífera predominantemente alógama, importante fruteira nas regiões tropicais e subtropicais do mundo, que produz frutos de alto valor nutricional, funcional, apresenta uma diversidade de cores de polpa. Importante para indústrias alimentícias na produção de doces, geleias, sucos, e com o ótimo clima e solo favorecendo, o Brasil possui uma grande produção comercial. (SINGH et al., 2015).

A goiabeira apresenta ampla variação quanto à coloração da polpa estão registrados no Ministério da Agricultura 15 cultivares de goiabeira, abrangendo variedades de polpa branca, rosada e vermelha, característica que tem motivado diversos estudos detalhados voltados à sua caracterização, para compreender os mecanismos regulatórios (MATHIAZHAGAN. et al, 2024). A cor constitui um parâmetro sensorial relevante na comercialização de frutos *in natura*, uma vez que influencia diretamente a aceitação pelo consumidor, sendo frequentemente utilizada como critério de escolha ou descarte. (MAPA, 2025)

Frutos com maior intensidade de coloração apresentam vantagens competitivas, pois a presença de pigmentos está associada a uma maior concentração de metabólitos secundários. Esses compostos desempenham funções fundamentais tanto no metabolismo vegetal, quanto na nutrição humana, já que não podem ser sintetizados e devem ser obtidos pela dieta. Assim, a coloração da polpa não apenas agrega valor comercial, mas também está relacionada ao potencial funcional e nutricional dos frutos (EMAM et al, 2025).

O desenvolvimento e a comercialização de novas variedades que atendam às exigências do mercado tornam-se objetivos prioritários para os programas de melhoramento genético da espécie (BEZERRA, 2020). Nesse contexto, a coloração da polpa das frutas não apenas agrega valor comercial, mas também pode indicar a qualidade funcional e nutricional do fruto, justificando seu uso como critério de seleção e prioridade em programas de melhoramento genético.

A coloração de frutas é influenciada por fatores ambientais, altas temperaturas, muita luminosidade, pH, e pode variar de tons vermelhos a violetas e azulados. A concentração de pigmentos como antocianinas e carotenoides é determinada geneticamente pela cultivar, mas também depende da exposição à luz, do estágio de maturação e das práticas pós-colheita. Esses compostos não apenas conferem coloração, mas impactam características sensoriais, aroma, cor, textura e sabor (RIGOLON, 2021; MAZZA & MINIATI, 1993).

Considerando esses aspectos, o estudo dos pigmentos em progênies de goiabas torna-se relevante. Avaliar a herança genética desses compostos e quantificar seus teores em progênies fornece informações essenciais para programas de melhoramento. O desenvolvimento de cultivares com concentrações elevadas de antocianinas e licopeno representa uma estratégia para produzir frutos com maior valor agregado, atender à demanda por alimentos funcionais e diversificar a fruticultura nacional, promovendo avanços nos programas de melhoramento genético

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo estimar os níveis de antocianinas e licopeno em progênies de goiabeira, oferecendo o desenvolvimento de novas cultivares com maior potencial bioativo. A dissertação está dividida em dois capítulos: Capítulo 1 - Estimativas de parâmetros de herdabilidade e repetibilidade para antocianinas e licopeno em populações de goiabeira. Capítulo 2 – Estimativas de correlações e análises de trilha para antocianinas e licopeno em populações de goiabeira.

REFERENCIAL TEÓRICO

A cultura da goiabeira

A goiabeira (*Psidium guajava* L.) destaca-se entre as frutíferas tropicais mais relevantes do ponto de vista econômico, com uso expressivo tanto para consumo direto quanto para a agroindústria. A produtividade média da goiaba no país foi de 25.919 kg/ha, com rendimento financeiro de R\$ 48.797 reais por cada um dos 22.487 hectares colhidos. A região Nordeste predomina na produção de goiaba com 47% de área, seguida pela região Sudeste com 39% do total de goiabas colhido no Brasil (IBGE, 2024).

A relevância econômica da espécie relaciona-se não apenas ao consumo *in natura*, por apresentar uma polpa delicada, e com variedade de cores, pode ser usada com uma gama de produtos processados, como sucos, geleias, manteigas de frutas, néctares e xaropes, o que assegura à goiaba posição estratégica como matéria-prima agroindustrial (ANGULO-LÓPEZ et al., 2021). A cultura da goiabeira possui expressiva importância socioeconômica no Brasil, sobretudo na região Nordeste, onde tradicionalmente sustentou a indústria de doces, responsável por absorver grande parte da produção (QUINTAL, 2013). Além de contribuir para o agronegócio nacional, a atividade garante emprego e renda em propriedades familiares e pequenas agroindústrias.

Classificada na família Myrtaceae, composta por cerca de 140 gêneros e mais de 3.500 espécies (MORAIS, 2014; GRESSLER et al., 2006), a goiabeira é uma árvore de porte baixo a

médio, cujos frutos, geralmente esféricos ou ovais, variam quanto ao diâmetro, textura da casca (áspera ou lisa), coloração da polpa (branca, rosada, roxa ou vermelha), firmeza (macia ou crocante) e número de sementes (SHUKLA, 2022).

A espécie apresenta rusticidade marcante e elevada plasticidade ambiental, sendo tolerante a períodos de estiagem e capaz de se desenvolver em diferentes condições edafoclimáticas. Entretanto, os melhores resultados produtivos são observados em regiões com precipitação anual de 1.000 a 2.000 mm, bem distribuída ao longo do ano (MENZEL, 1985). Quanto ao solo, embora apresente ampla adaptabilidade, alcança maior produtividade em ambientes argilosos, férteis, profundos e com boa drenagem (MENZEL, 1985). Entre as práticas de manejo, a poda ocupa papel central na indução da frutificação e na regulação do fluxo de produção, permitindo ajustar a oferta ao mercado e reduzir perdas pós-colheita, frequentes em frutos altamente perecíveis (TIWARI et al., 1992; KUMAR; RATTANPAL, 2010).

No Brasil, a floração da goiabeira ocorre, em geral, duas vezes ao ano: no mês de março, correspondente à safra de verão, e em agosto, referente à safra de inverno. Entretanto, fatores ambientais, edáficos e genéticos influenciam a intensidade e a regularidade desses ciclos (HUSSAIN, 2021). No Vale do São Francisco a produção de goiaba pode ser realizada em qualquer época do ano, com manejo de poda e irrigação.

As flores são axilares, hermafroditas, de coloração branca, com exceção da flor da goiabeira roxa, que possuem flor roxa, com longos e numerosos estames, hermafroditas sendo espécie predominantemente alógama. Os principais polinizadores são abelhas, que atuam na transferência de pólen e asseguram tanto a frutificação quanto a variabilidade genética da população (PROENÇA; GIBBS, 1994; LUGHADHA; PROENÇA, 1996).

A diversidade fenotípica dos frutos é ampla, englobando diferenças de formato (esférico a ovalado), coloração da polpa (branca, rosada, amarela ou vermelha), firmeza, número de sementes e textura da casca (SHUKLA, 2022). Essa variabilidade morfológica reflete a base genética heterogênea da espécie, condição essencial para estratégias de melhoramento genético.

Entre as cultivares brasileiras, a Paluma é uma das mais difundidas, com produtividade superior a 50 t/ha/ano, frutos grandes (superiores a 200 g), formato piriforme e polpa vermelha intensa, características que a tornam adequada tanto para a indústria quanto para o consumo in natura (GONZAGA NETO, 2001; KAVATI, 2004). Outra variedade importante é a Pedro Sato, de frutos grandes (300–400 g), polpa rosada e firme, com reduzido número de sementes, bastante apreciada comercialmente (KAVATI, 1997, 2004).

Mais recentemente, a goiaba roxa tem despertado interesse científico e mercadológico em razão da presença de antocianinas, pigmentos bioativos responsáveis pela coloração intensa e associados a benefícios nutricionais. Além do valor agregado no mercado de frutas frescas e processadas, esta variedade também apresenta potencial para recuperação ambiental, uma vez que suas sementes são amplamente distribuídas por aves e outros animais (SILVA, 2017).

No aspecto nutricional, a goiaba é considerada fonte relevante de compostos bioativos, destacando-se pela alta concentração de vitamina C, além de fenólicos totais, carotenoides, fibras alimentares e minerais (MEDINA; HERRERO, 2016; SAHU, 2020). Essa composição reforça seu potencial como alimento funcional e como insumo para a indústria de alimentos e nutracêuticos.

Pigmentos vegetais em frutos tropicais

Os pigmentos vegetais são compostos bioativos responsáveis pelas cores características de frutos, flores e folhas, desempenhando funções fisiológicas essenciais nas plantas e oferecendo benefícios nutricionais e funcionais à saúde humana (SINGH et al., 2023). Esses pigmentos contribuem para a atratividade dos frutos, influenciando a dispersão de sementes por polinizadores e frugívoros, além de atuarem como antioxidantes e moléculas protetoras contra estresses ambientais (DAVIES, 2004; WALLACE, 2011).

Os pigmentos vegetais podem ser classificados em duas categorias principais: 1) lipossolúveis, como clorofilas e carotenoides, localizados nos plastídios das células vegetais, responsáveis por coloração verde, amarela, laranja e vermelha (HUMPHREY, 2004; KONG et al., 2003); 2) hidrossolúveis, como antocianinas e outros flavonoides, presentes no vacúolo das células vegetais, conferindo tons vermelhos, azuis e roxos (WROLSTAD, 2004; ZHOH et al., 2010).

Estes pigmentos podem ser descritos tanto pelo comprimento de onda de máxima absorção (λ_{max}) quanto pela cor percebida visualmente, sendo a absorção da luz determinante para a coloração observada (DAVIES, 2004). Além de fornecerem cor, os pigmentos vegetais possuem funções bioquímicas importantes. As antocianinas, por exemplo, apresentam atividade antioxidante, ajudam na proteção contra radicais livres e contribuem para a saúde cardiovascular e cognitiva (WALLACE, 2011). Já os carotenoides exercem efeito antioxidante, fortalecem o sistema imunológico e promovem saúde da pele, estando também associados à prevenção de doenças degenerativas (NABI et al., 2020).

A regulação da síntese desses pigmentos ocorre principalmente na transcrição de genes biossintéticos, sendo pouco conhecida a degradação e rotatividade destes compostos (Davies, 2004). Frutas tropicais, como a goiabeira, mangueira (*Mangifera indica* L.) e aceroleira (*Malpighia emarginata* D.C.), apresentam alta diversidade de pigmentos vegetais, incluindo carotenoides e antocianinas, que contribuem para a coloração da polpa e da casca. Estudos indicam que variedades de polpa vermelha possuem maior concentração desses pigmentos em comparação com variedades de polpa branca (MATHIAZHAGAN et al., 2021).

Na goiabeira, por exemplo, os carotenoides identificados incluem β -caroteno, licopeno e zeaxantina, sendo o licopeno o pigmento predominante na polpa vermelha, com concentração variando de 0,04 a 4,04 mg/100 g de fruto (KAREEM, 2024). Esses pigmentos estão associados a propriedades antioxidantes e nutraceuticas significativas (IHA et al., 2008). Além disso, folhas e frutos contêm outros compostos bioativos, como polissacarídeos, terpenoides, flavonoides, glicosídeos e taninos, que reforçam o potencial funcional desses frutos (SINGH et al., 2023).

Além da função nutricional, os pigmentos vegetais têm aplicações na indústria alimentícia como corantes naturais, substituindo corantes sintéticos. Suas propriedades antioxidantes também permitem uso em cosméticos e produtos farmacêuticos, tornando os frutos tropicais uma fonte estratégica de compostos bioativos, que ajudam de forma direta na prevenção de algumas doenças (HUMPHREY, 2004; GANDIA-HERRERO et al., 2010).

Antocianinas e carotenoides na goiabeira

A goiabeira, possui grande relevância tanto na alimentação quanto na medicina tradicional, sendo utilizada em diversas regiões, como México, África, Ásia e América Central (BRIDLE & TIMBERLAKE, 1997; LI, 2017). Suas folhas são frequentemente preparadas como chá e empregadas no tratamento de diarreia, distúrbios gastrointestinais, disenteria, hipertensão, diabetes e cáries dentárias (HAIDA, 2015).

Além de seu valor medicinal, as folhas da goiabeira são ricas em macro e micronutrientes, incluindo carboidratos, carotenoides, ácidos graxos, polifenóis, vitaminas e minerais, além de compostos voláteis com potencial terapêutico (OVANDO, 2009; BOTANY, 2015).

A caracterização metabolômica de variedades de goiabeira tem como objetivo identificar o maior número possível de metabólitos, permitindo comparações detalhadas e a diferenciação entre cultivares (SIRIWOHARN, 2004; TAN, 2022). Entre os compostos de

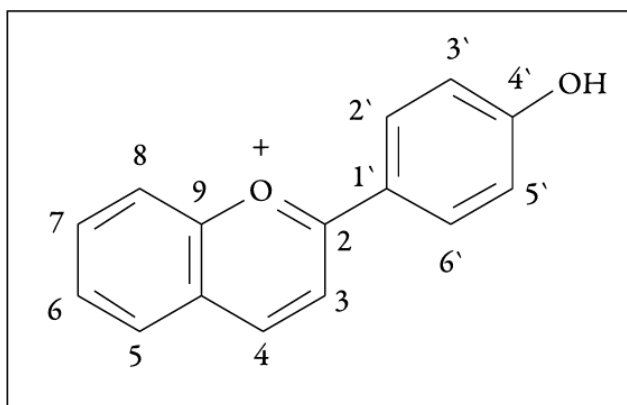
maior interesse estão as antocianinas e os carotenoides, responsáveis pelas cores vibrantes da polpa e da casca, bem como por diversas funções biológicas.

Antocianinas

O termo antocianina é de origem grega (anthos, uma flor, e kyanos, azul escuro). Compõem o maior grupo de pigmentos solúveis em água do reino vegetal e são encontradas em maior quantidade nas angiospermas, responsáveis por inúmeras tonalidades de cores (BRIDLE & TIMBERLAKE, 1997). Estão presentes nos tecidos de plantas superiores, desde folhas, caules, raízes, flores e frutos, desencadeando diversas funções nas plantas, uma delas reprodutiva, por causar a atração de insetos envolvidos na polinização, de fotoproteção, de defesa contra certos tipos de agressores e antioxidante. (BOTANY, 2015).

Estruturalmente, as antocianinas possuem um esqueleto de 15 átomos de carbono (C6-C6) (Figura 1), e sua coloração pode ser influenciada por fatores ambientais, como pH, temperatura e luminosidade, além de interações químicas com outros compostos (KONG, 2003; BORDIGNON, 2009). O pH é o principal fator que determina a cor das antocianinas: em meio ácido, predominam tons vermelhos (cátion flavílio), enquanto em meio alcalino predominam tons azulados (base quinoidal), embora instáveis (MAZZA & BROUILLARD, 1987).

Figura 1. Estrutura da Antocianina

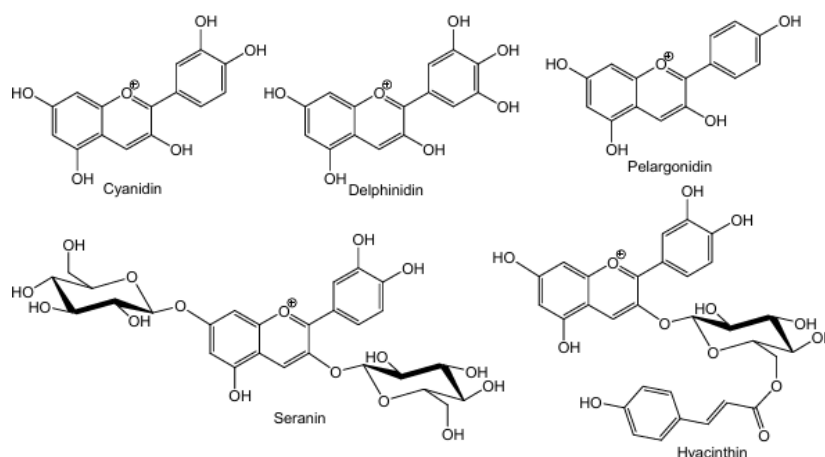


Fonte: Cardoso, Leite e Peluzio (2011)

Além disso, as antocianinas apresentam diferentes subgrupos, como pelargonidina (vermelho), cianidina (violeta) e delphinidina (azul) (Figura 2), cuja absorção de luz visível interage com a clorofila, resultando em diferentes tonalidades dependendo do tecido e das condições ambientais (BROUILLARD, 1982; OVANDO, 2009). Estes pigmentos têm grande impacto na cor dos alimentos, fator determinante na aceitação pelo consumidor (BRIDLE &

TIMBERLAKE, 1997). Os efeitos biológicos antioxidantes das antocianinas dependem do anel B em sua estrutura e da presença do número de hidroxilas, metoxila e o grau de glicosilação. (KONG, 2003).

Figura 2. Subgrupos da antocianina



Fonte: Roy et al. (2022)

Do ponto de vista nutricional, as antocianinas exercem atividades biológicas importantes, incluindo efeitos antioxidantes, neuroprotetores, cardiovasculares, antidiabéticos, anticancerígenos e anti-envelhecimento (LI, 2017; HAIDA, 2015). A concentração de antocianinas nos frutos pode variar conforme condições de cultivo, exposição à luz UV, estágio de maturação e método de colheita (SIRIWOHARN, 2004). Cultivares com polpa roxa, como 'Thai Maroon' e 'Black Guava', apresentam teores significativos de antocianinas, sendo excelentes fontes naturais desse pigmento (FLORES et al., 2015; SENAPATI, 2022).

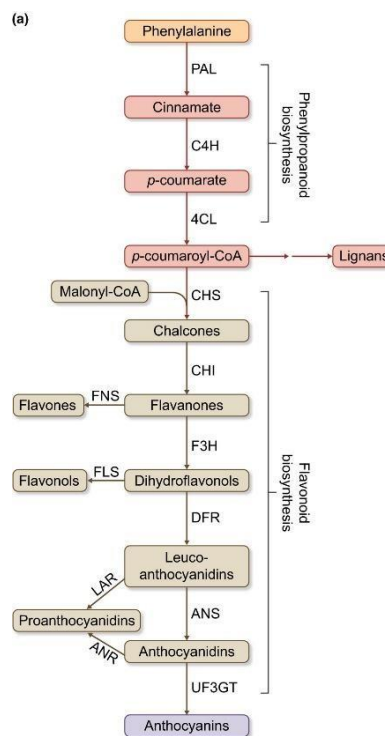
Estes corantes naturais têm um enorme impacto sobre a cor de certos alimentos, se encontram difundidos, no mínimo, em 27 famílias, 73 gêneros e numa grande variedade de espécies. Comercialmente a cor dos alimentos é um parâmetro importante de aceitabilidade pelos consumidores, devido à atração visual (BRIDLE & TIMBERLAKE, 1997, BRIDLE, 1997). Os métodos de extração mais utilizados incluem solventes polares, como metanol, etanol e água acidificada, aplicados sob condições controladas de tempo, temperatura e proporção sólido-líquido (TAN, 2022).

A quantidade de antocianinas presentes nos alimentos pode variar amplamente entre diferentes espécies e variedades, sendo especialmente elevadas em frutas vermelhas, vinho tinto e grãos de coloração intensa, como o arroz preto e o milho roxo. Esses compostos não apenas intensificam a coloração natural dos alimentos, mas também contribuem para a melhoria de

suas características nutricionais. Uma das funções mais importantes das antocianinas é a atividade antioxidante, que desempenha papel relevante na proteção contra danos celulares e na manutenção da saúde (CUSTODIO, 2024).

Estudar a biodisponibilidade e a estabilidade dessas moléculas nos alimentos é essencial para aproveitar ao máximo seus efeitos benéficos e garantir a qualidade do produto (MESERY, 2019). Além disso, a identificação e caracterização de tipos específicos de antocianinas possibilitam avaliações mais precisas da capacidade antioxidante, abrindo caminho para a formulação de alimentos funcionais enriquecidos com compostos bioativos direcionados à promoção da saúde (CUSTODIO, 2024).

Figura 3. Cadeia biossintética antocianina



Fonte: LaFountain e Yuan (2021)

A biossíntese de antocianinas em plantas ocorre por meio de uma complexa via metabólica que integra o metabolismo dos fenilpropanoides e dos flavonoides. O processo tem início com o aminoácido fenilalanina, que é convertido em cinamato pela ação da enzima fenilalanina amônia-liase (PAL). Em seguida, o cinamato é hidroxilado pela cinamato-4-hidroxilase (C4H), originando o p-cumarato, que, por sua vez, é ativado pela 4-cumarato:CoA ligase (4CL), formando o p-coumaroyl-CoA. Este composto representa um importante ponto de ramificação, podendo ser direcionado tanto para a síntese de ligninas quanto para a via dos flavonoides. (WINKEL-SHIRLEY, 2001; HOLTON & CORNISH, 1995).

Na via flavonoide, o p-coumaroil-CoA é condensado com unidades de malonil-CoA pela enzima chalcona sintase (CHS), formando chalconas, que são posteriormente isomerizadas em flavanonas pela chalcona isomerase (CHI). As flavanonas são convertidas em dihidroflavonóis pela flavanona-3-hidroxilase (F3H), os quais constituem intermediários centrais dessa via metabólica. A partir desse ponto, os dihidroflavonóis podem ser direcionados para a síntese de flavonóis, via flavonol sintase (FLS), ou seguir para a produção de antocianinas. (WINKEL-SHIRLEY, 2001; GROTEWOLD, 2006).

A formação de antocianinas envolve a redução dos dihidroflavonóis a leucoantocianidinas, catalisada pela dihidroflavonol redutase (DFR). Posteriormente, essas moléculas são convertidas em antocianidinas pela ação da antocianidina sintase (ANS). Por fim, as antocianidinas são estabilizadas por glicosilação, mediada pela UDP-glucose:flavonoide-3-O-glicosiltransferase (UFGT), resultando na formação das antocianinas. Alternativamente, as leucoantocianidinas podem ser desviadas para a síntese de proantocianidinas, compostos relacionados à defesa vegetal. (HOLTON & CORNISH, 1995; GROTEWOLD, 2006)

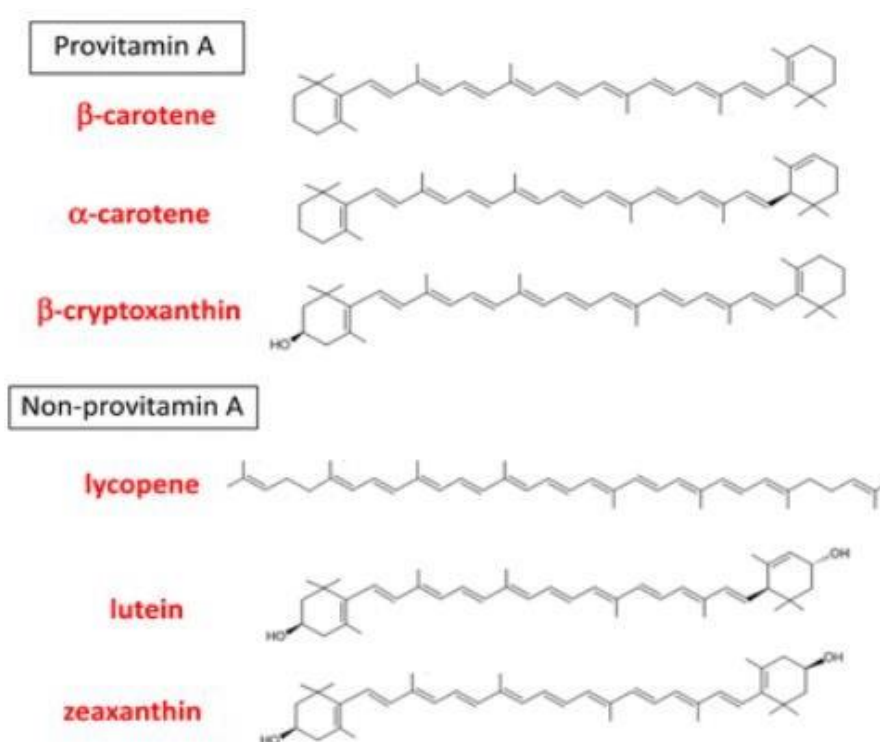
A produção de antocianinas resulta da interação entre rotas metabólicas bem definidas e um sistema regulatório complexo, influenciando diretamente a intensidade e a distribuição da pigmentação nos vegetais.

Carotenoides

Os carotenoides constituem um grupo de pigmentos lipossolúveis pertencentes à classe dos terpenoides C₄₀, englobando mais de 600 compostos produzidos por plantas e cerca de 50 espécies de microrganismos (TUFAIL, 2024). Estruturalmente, são responsáveis pela coloração que varia do amarelo ao vermelho em frutas e vegetais, desempenhando funções biológicas importantes para os organismos produtores.

O organismo humano não possui a capacidade de sintetizar carotenoides, sendo necessária a ingestão desses compostos por meio da dieta. Estudos demonstram que o corpo humano acumula diversos carotenoides alimentares, podendo absorver mais de 40 tipos em concentrações variadas (TERAO, 2023). Dentre eles, seis carotenoides predominam no plasma e nos tecidos humanos: α -caroteno, β -caroteno, licopeno, β -criptoxantina, luteína e zeaxantina. Alguns desses compostos, durante o metabolismo, atuam como precursores da vitamina A, enquanto outros não possuem essa capacidade (KHACHIK, 1992) (Figura 4)

Figura 4. Estrutura dos seis carotenoides



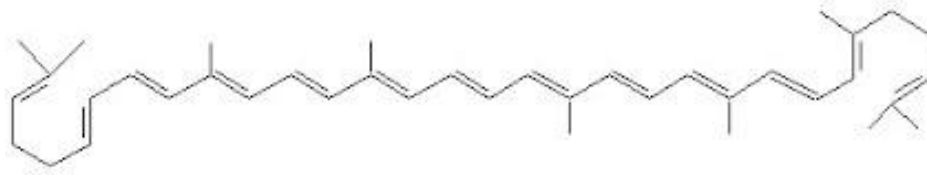
Fonte: Linus Pauling Institute (2021)

As principais fontes alimentares desses carotenoides incluem: α -caroteno em cenouras, abóbora de inverno e abóbora; β -caroteno em frutas e vegetais verde-alaranjados e escuros; licopeno em tomates e produtos derivados; β -criptoxantina em frutas tropicais e pimentões vermelhos doces; luteína em folhas verdes, milho e vegetais verdes; e zeaxantina em gema de ovo, milho, fubá de milho e folhas verdes (HOLDEN, 1999).

Nos frutos, os carotenoides desempenham funções ecológicas, como atratividade para polinizadores e animais dispersores de sementes, além de proteção contra danos causados pela radiação luminosa (TUFAIL, 2024; GONZÁLEZ-PEÑA et al., 2023). Entre os carotenoides, o licopeno apresenta a maior capacidade antioxidante, seguido por α -caroteno, β -criptoxantina, zeaxantina e β -caroteno, enquanto a luteína demonstra menor atividade antioxidante (LI, 2017).

O licopeno é um hidrocarboneto alifático altamente insaturado, conferindo a coloração vermelha característica. É lipossolúvel e solúvel em solventes apolares (BRIDLE & TIMBERLAKE, 1997; FLORES ET AL., 2015) (Figura 5).

Figura 5. Estrutura Licopeno



Lycopene (C₄₀H₅₆)

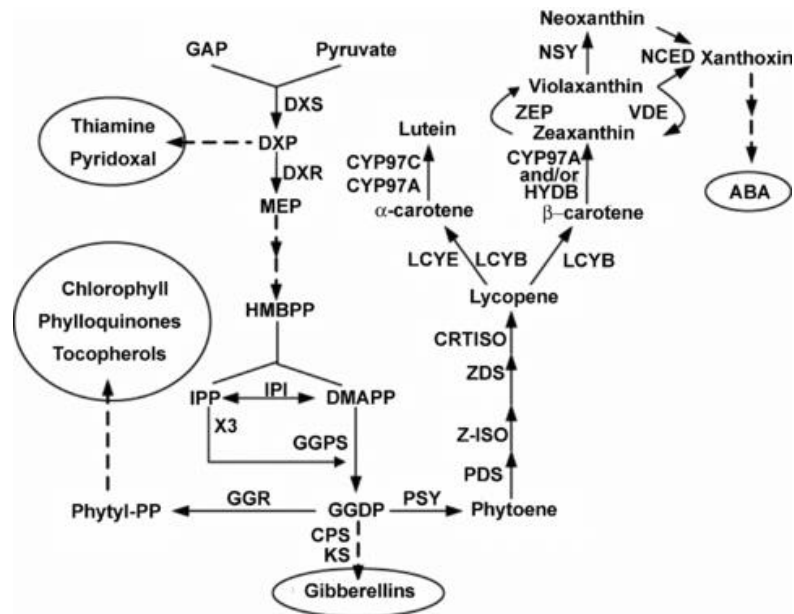
Fonte: Meldau (s.d.).

Devido à sua alta sensibilidade à oxidação, luz e temperaturas elevadas, o licopeno é facilmente degradado ou isomerizado (SENAPATI, 2022). O organismo humano não sintetiza este carotenoide, sendo essencial sua ingestão através de alimentos como goiaba rosa/vermelha, tomate, damasco e melancia, os quais contribuem para o fortalecimento do sistema imunológico, regulação dos lipídios sanguíneos e prevenção de doenças cardiovasculares (OVANDO, 2009).

Além disso, o licopeno, em associação com antocianinas e outros carotenoides, é responsável pela coloração rosada das goiabas (BOSE et al., 2019; KUMARI et al., 2020; SHUKLA et al., 2021; SINGH et al., 2019; THAKRE et al., 2016). Estudos indicam que sua capacidade de neutralizar radicais livres é duas vezes maior que a do β -caroteno e dez vezes maior que a do γ -tocoferol. Além disso, apresentam atividades imunomoduladoras, hormonais e anticancerígenas, e efeitos anti-inflamatórios, o que evidencia seu valor na medicina, biologia e áreas afins (BOULAAJINE & HAJJAJ, 2024; KAN, 2023).

A extração do licopeno requer cuidados específicos devido à sua instabilidade frente à luz, calor e oxidação, fatores que podem acelerar significativamente sua degradação e isomerização (JIANG, 2024).

Figura 6. Cadeia biossintética carotenoide



Fonte: Lu e Li (2008)

A via biossintética dos carotenoides em plantas ocorre nos plastídios e inicia-se com a via do metileritritol fosfato (MEP), responsável pela formação dos precursores isoprenoides IPP e DMAPP. Esses compostos são convertidos em geranylgeranyl difosfato (GGDP), que atua como substrato central para a síntese de carotenoides, giberelinas, clorofilas e tocoferóis. (LICHTENTHALER, 1999; RUIZ-SOLA; RODRÍGUEZ-CONCEPCIÓN, 2012)

A partir de GGDP, a ação da fitoeno sintase (PSY) origina o fitoeno, que, por meio de reações sequenciais de dessaturação e isomerização, resulta na formação do licopeno, um carotenoide acíclico com sistema extensivo de duplas ligações conjugadas, responsável por sua coloração vermelha. O licopeno representa um importante ponto de bifurcação na via biossintética, podendo ser ciclado por diferentes enzimas ciclases, podendo ser convertido em α -caroteno e posteriormente luteína, ou em β -caroteno, dando origem a xantofilas como zeaxantina, violaxantina e neoxantina. (CAZZONELLI, 2011; NISAR et al., 2015)

Essas últimas participam do ciclo das xantofilas e atuam como precursores do ácido abscísico (ABA), um importante hormônio vegetal envolvido na resposta a estresses abióticos. Dessa forma, a via dos carotenoides apresenta papel central na fisiologia vegetal, integrando processos de desenvolvimento, fotoproteção e adaptação ao ambiente. (NAMBARA; MARION-POLL, 2005; FINKELSTEIN, 2013; SUN et al., 2018).

Métodos de quantificação de antocianinas e carotenoides

Método de antocianinas

As antocianinas são pigmentos hidrossolúveis responsáveis pela coloração de diversos frutos e vegetais, cuja estabilidade é influenciada por múltiplos fatores, incluindo a estrutura química (número de hidroxilas, grau de metilação e glicosilação), o pH, a temperatura, a luz, a presença de oxigênio, a degradação enzimática e as interações com outros componentes dos alimentos, como ácido ascórbico, íons metálicos, açúcares e copigmentos (FRANCIS, 1989).

A concentração e a qualidade das antocianinas obtidas a partir de plantas dependem fortemente das condições de extração. Diversos métodos têm sido desenvolvidos, utilizando solventes polares como água, metanol, etanol e acetona, isoladamente ou em combinações, frequentemente com a adição de ácidos como clorídrico ou fórmico, a fim de reduzir o pH e minimizar a oxidação durante o processo (TURKER, 2005; WELCH, 2008). A extração de antocianinas de vegetais vermelhos, por exemplo, é geralmente realizada em solventes acidificados, o que favorece a preservação da cor e evita a degradação oxidativa (LEES; FRANCIS, 1972; LEE; HONG, 1992).

Estudos indicam que a temperatura exerce efeito crítico sobre a estabilidade das antocianinas. O aquecimento durante extração ou processamento alimentar pode causar perda significativa da coloração e redução do teor de antocianinas (CESA et al., 2017). A exposição à luz também acelera a degradação desses pigmentos, sendo recomendado o armazenamento em condições de escuridão para preservar sua coloração, mesmo em períodos curtos, como 24 horas (KEARSLEY; RODRIGUEZ, 1981). Além disso, a temperatura de armazenamento deve ser controlada para evitar o escurecimento e a perda de bioatividade das antocianinas (MACCARONE et al., 1985; WADIBHASME et al., 2020; ENARU et al., 2021).

A extração convencional sólido-líquido consiste na difusão do solvente através da matriz vegetal sólida, podendo ser influenciada pela estrutura da planta, tamanho das partículas, temperatura e pH do solvente (CISSÉ et al., 2012). O metanol e o etanol são os solventes mais empregados em extratos de antocianinas, conforme demonstrado em estudos com *Syzygium cumini* L. (amora-preta indiana) (MARAN et al., 2014). No entanto, temperaturas elevadas durante a extração podem acelerar a degradação dos pigmentos, sendo essencial adequar as condições para maximizar a estabilidade das antocianinas.

O método proposto por Fuleki e Francis (1968), inicialmente aplicado em *cranberry*, consolidou-se como referência para a quantificação de antocianinas em diferentes frutos. Sua

aplicação tem sido relatada em espécies como jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) (LIMA, 2011), morango (SONDHEIMER, 1948) e jambo vermelho (*Syzygium malaccensis*) (AUGUSTA, 2013). Apesar da necessidade de adaptações metodológicas conforme as particularidades de cada matriz vegetal, a utilização do mesmo reagente base assegura consistência e confiabilidade às análises.

Método de carotenoides

Nos últimos anos, o desenvolvimento de métodos aprimorados para a extração de carotenoides tem sido intensamente estudado, dada a importância desses pigmentos na qualidade nutricional e sensorial de frutos. Os carotenoides são altamente sensíveis a fatores ambientais, como calor, luz, oxigênio e ácidos, o que pode provocar degradação ou isomerização parcial durante o processo de extração. Por isso, é necessário adotar precauções para preservar sua integridade química (MELÉNDEZ-MARTÍNEZ et al., 2020).

A escolha do solvente de extração depende da complexidade da matriz vegetal e da polaridade dos carotenoides presentes. Tradicionalmente, a extração é realizada a partir de fontes onde os pigmentos estão em maior concentração. Métodos convencionais, baseados na extração sólido-líquido em pressão atmosférica, apresentam limitações significativas, como baixo rendimento, grande consumo de solventes, baixa seletividade e longos tempos de extração. Além disso, podem expor os carotenoides a calor, luz e oxigênio em excesso, comprometendo a estabilidade dos extratos (SAINI, 2017).

Durante a maturação de frutos, ocorre a degradação da clorofila presente no fruto verde, concomitante à síntese de licopeno, resultando na coloração vermelha característica. Esse fenômeno pode ser explorado para a quantificação simultânea de clorofilas e carotenoides, utilizando as diferenças em seus espectros de absorção visível (NAGATA & YAMASHITA, 1992). Estudos preliminares com diferentes solventes indicaram que a mistura acetona-hexano (4:6, v/v) proporciona condições adequadas para extração eficiente desses pigmentos. Para fins de quantificação espectrofotométrica, os comprimentos de onda característicos são 663 nm para clorofila a, 645 nm para clorofila b, 453 nm para luteína e 505 nm para licopeno, permitindo a medição baseada nos coeficientes de absorção de cada pigmento (NAGATA & YAMASHITA, 1992).

A extração por solvente orgânico é um dos métodos mais tradicionais, envolvendo a dissolução de carotenoides em solventes como acetato de etila, metanol ou etanol. Dependendo da natureza do material, podem ser aplicadas técnicas de extração sólido-líquido ou líquido-

líquido, sendo a seleção do agente de extração determinada pela composição do extrato (JIANG, 2024).

Recentemente, os métodos de extração de carotenoides vêm sendo aprimorados, com a incorporação de solventes e técnicas que promovem processos mais rápidos, econômicos e eficientes. O método desenvolvido por Nagata e Yamashita, inicialmente aplicado em tomate, tem sido adotado em diversas matrizes, incluindo derivados de goiaba e cenouras frescas (*Daucus carota L.*), devido à sua rapidez e simplicidade (SAPONJAC, 2021; FREIRE, 2012).

Herdabilidade

A herdabilidade é um conceito central em genética quantitativa, permitindo a comparação da contribuição relativa de fatores genéticos e ambientais para a variação observada em características fenotípicas dentro e entre populações (ACQUAAH, 2012; WANG et al., MAIA, 2016; Visscher et al., 2008). Esse parâmetro conecta a variação fenotípica de características complexas à sua base genética subjacente, permitindo prever efeitos genéticos, a evolução da população a longo prazo e a resposta à seleção, que é o objetivo principal no melhoramento de plantas e animais (FALCONER, 1960)

Uma questão central na biologia é determinar se a variação observada em uma característica se deve principalmente a fatores ambientais ou biológicos. A herdabilidade sintetiza essa informação ao estimar a proporção do fenótipo que é herdável, especialmente em relação à semelhança entre pais e descendentes (ACQUAAH, 2012; VISSCHER et al., 2008).

A herdabilidade é formalmente definida como a razão entre componentes de variância, sendo os dois tipos principais:

1. Herdabilidade em sentido amplo (h_A^2), que inclui todos os componentes da variância genética, como aditiva, de dominância e epistática, em relação à variância fenotípica total. Apesar de fornecer uma visão global da contribuição genética, nem todos os componentes são transmitidos aos descendentes, limitando sua aplicação prática na seleção (ACQUAAH, 2012).
2. Herdabilidade em sentido restrito (h_R^2), considera apenas a variância genética aditiva, que é o componente hereditário transmissível aos descendentes. Esta medida é particularmente útil em programas de melhoramento, pois garante maior previsibilidade na seleção de indivíduos superiores (WANG et al., 2020; MAIA, 2016). Valores medianos a altos de herdabilidade e repetibilidade permitem a seleção precoce de genótipos, com acurácia significativa mesmo com poucas medições (MAIA, 2016).

Valores elevados de herdabilidade refletem maior eficiência na seleção, pois o desempenho observado está intimamente ligado ao potencial genético do indivíduo. Em espécies perenes, como o cacaueteiro, a herdabilidade é amplamente utilizada para planejar estratégias de seleção ao longo de diferentes ciclos de colheita (MEDEIROS et al., 2022).

Estimativas elevadas de herdabilidade, quando acompanhadas de ganhos genéticos relevantes, constituem base sólida para a identificação de genótipos superiores. Em goiabeira investigações têm indicado herdabilidade elevada para caracteres como peso de sementes, comprimento e largura de frutos, enquanto outros atributos apresentam valores mais baixos, refletindo a influência da natureza do caráter avaliado (SINGH et al., 2015).

Em citros, verificou-se que a variabilidade genética aditiva contribui para a seleção de plantas mais produtivas, com melhor arquitetura de copa e maior vigor vegetativo, características alinhadas às necessidades atuais da citricultura (BOWMAN, 2023).

De acordo com Ambrosio (2023), a herdabilidade tende a declinar quando a variância genética é restrita e a interferência ambiental exerce maior efeito, reduzindo a resposta à seleção. Padrão semelhante é observado em fruteiras perenes, como a bananeira, em que ainda são escassos os trabalhos organizados sobre herdabilidade de caracteres agrônômicos, dificultando o estabelecimento de estratégias de melhoramento consistentes (BAKRY et al., 2009). No caso da goiabeira, pesquisas recentes têm buscado estimar a herdabilidade de atributos de interesse comercial, como produtividade, dimensões do fruto, resistência a doenças e qualidade, incluindo teor de vitamina C, acidez e pectina. Contudo, muitas dessas características apresentam valores reduzidos, indicando a necessidade de adoção de estratégias seletivas mais rigorosas e conduzidas em ciclos mais longos (POMMER; MURAKAMI, 2009).

Repetibilidade

O coeficiente de repetibilidade constitui um parâmetro fundamental para estimar a capacidade de um indivíduo em expressar de forma consistente determinada característica ao longo de múltiplos ciclos de avaliação. Este índice fornece informações sobre a confiabilidade das medições e auxilia na previsão de valores genotípicos, eficiência de seleção e herdabilidade, mesmo quando se dispõe de um número reduzido de observações (MAIA, 2013)

Em termos conceituais, a repetibilidade refere-se à correlação entre avaliações sucessivas de um mesmo caráter em um indivíduo, considerando variações ao longo do tempo ou do espaço, expressando a fração da variância total atribuível ao genótipo e a efeitos ambientais permanentes compartilhados. Assim, o coeficiente de repetibilidade (R) pode

representar o limite superior da herdabilidade no sentido amplo, variando entre zero e um ($0 \leq h^2 \leq R \leq 1$), sendo valores elevados indicativos de que o desempenho real do indivíduo pode ser estimado com poucas medições. (MEDEIROS et al., 2022).

$$R = (Vg + Veg) / Vp$$

A repetibilidade desempenha papel importante em programas de melhoramento, sobretudo em espécies de ciclo longo, ao quantificar a consistência do desempenho individual em avaliações sucessivas, permitindo reduzir o número de observações necessárias e, consequentemente, otimizar recursos e tempo (SILVA, 2022). O modelo mais simples para estimativa de repetibilidade considera efeitos residuais independentes e pressupõe correlações constantes entre registros repetidos, incorporando, de forma conjunta, variações genéticas e ambientais permanentes.

Modelos mistos, por sua vez, têm se destacado na análise genética de plantas, ao possibilitar a inclusão simultânea de efeitos fixos e aleatórios. Entre estes, a abordagem REML/BLUP é amplamente utilizada, permitindo estimar componentes de variância com máxima verossimilhança restrita e prever valores genéticos, tendo sido aplicada com sucesso em diferentes espécies, como coco (NETO et al., 2009) e arroz (BORGES et al., 2010).

Apesar de seu potencial para indicar o limite superior da herdabilidade, a repetibilidade pode não refletir integralmente a contribuição genética em determinadas situações, tais como: quando os caracteres avaliados não possuem identidade genética, os efeitos ambientais comuns atuam em oposição aos genéticos, quando há correlação negativa entre ambientes temporários, quando ocorre interação significativa genótipo $\times$ ambiente. (DOHM, 2002)

Em programas de melhoramento de palmeiras, estimativas de repetibilidade têm sido empregadas para determinar o número e o período ideal de avaliações dos genótipos, otimizando a eficiência do processo seletivo. No caso da macaúba, apresenta poucos estudos, porém avaliar características biométricas dos frutos estabelecem o número mínimo de medições necessário para uma seleção eficaz (MANFIO, 2011).

A compreensão da repetibilidade também é estratégica para o aumento da diversidade genética em culturas como a manga. Segundo Costa (2023) o baixo grau de variabilidade nos pomares comerciais brasileiros evidencia a necessidade de ampliação da base genética, dessa forma a eficiência da seleção depende de abordagens conceituais adequadas que subsidiem decisões durante o processo de melhoramento.

Na área de melhoramento genético, estimativas de herdabilidade, repetibilidade individual e correlações entre caracteres são parâmetros fundamentais, pois auxiliam na

predição do progresso genético e na identificação dos indivíduos e famílias mais promissores. Esse tipo de abordagem foi empregado por Ambrósio (2020), que avaliou o coeficiente de repetibilidade em atributos relacionados à produtividade, em goiabas. Outros trabalhos em goiabeira, foram aplicadas para variáveis como peso médio, número de frutos por planta e produção total (QUINTAL et al., 2017).

Em espécies frutíferas de ciclo perene, esses estudos também se mostraram relevantes para determinar o número adequado de avaliações fenotípicas, como reportado para laranjeira-doce (*Citrus sinensis*) (CAPISTRANO et al., 2025) e mangueira (*Mangifera indica* L.) (MAIA et al., 2017). A escolha de genótipos superiores, entretanto, requer avaliações sucessivas ao longo do tempo, as quais, em geral, estão associadas a experimentos de grande escala, diversos ciclos de seleção e análises de múltiplos caracteres, resultando em custos elevados e longos períodos de condução, situação já descrita em estudos com maracujazeiro (*Passiflora edulis* Sims) (NEVES et al., 2010).

Métodos de estimação de parâmetros genéticos

A utilização de métodos estatísticos adequados para o planejamento experimental e análise de dados é amplamente reconhecida como essencial em todas as áreas científicas. O desenvolvimento de técnicas eficazes para tratar dados correlacionados permitiu avanços significativos na análise de experimentos complexos. Entre essas ferramentas, destacam-se os modelos lineares e generalizados de efeitos mistos (ME), nos quais testes clássicos, como o *t* de Student e a ANOVA, podem ser considerados casos particulares (YU et al., 2021).

O modelo de análise de variância (ANOVA) representa uma estratégia clássica para a estimação da repetibilidade. Esse método baseia-se em modelos lineares mistos, nos quais o desempenho ou rendimento de cada indivíduo é registrado em múltiplas medições. Entre as principais suposições estão: os efeitos individuais seguem uma distribuição normal com média zero e variância definida; os erros são independentes, normalmente distribuídos e com variância constante; há independência entre efeitos e erros; e todos os indivíduos são avaliados em um número igual de repetições. Repetibilidade elevada indica maior consistência nas medições repetidas e maior influência dos efeitos individuais em relação às variações ambientais temporárias (MANSOUR; NORDHEIM; RUTLEDGE, 1981).

A análise de Máxima Verossimilhança Restrita (REML) é amplamente empregada para estimar componentes de variância e herdabilidade, sendo considerada superior à máxima verossimilhança (ML) tradicional, pois reduz o viés na estimativa de parâmetros de variância

associado à presença de efeitos fixos (PATTERSON; THOMPSON, 1971; LYNCH; WALSH, 1998). O REML baseia-se na teoria de grandes amostras, assumindo que as estimativas paramétricas seguem uma distribuição multivariada normal assintótica, com matriz de covariância dada pelo inverso da matriz de informação (RAMEEZ et al., 2022).

Nas últimas décadas, os modelos lineares mistos (LMM) tornaram-se ferramentas centrais na análise de dados de melhoramento genético. Além de estimar componentes de variância, permitem a previsão de valores de melhoramento genético, considerando que as estimativas obtidas são corretas (SEARLE et al., 2009). O REML é especialmente relevante em experimentos com pedigree, pois maximiza a utilização de informações disponíveis e permite incorporar correlações genéticas entre diferentes características (STRANDÉN et al., 2024).

A avaliação genética constitui um pilar do melhoramento de populações, fornecendo subsídios para decisões de manejo e seleção. Modelos multivariados de efeitos mistos permitem considerar simultaneamente múltiplos traços, explorando as correlações genéticas e ambientais entre eles para aumentar a precisão das estimativas (AHLINDER et al., 2025). Em particular, os modelos multitrait LMM apresentam maior acurácia na estimação de características com baixa herdabilidade, populações de pequeno tamanho ou quando há dados ausentes (PERSSON; ANDERSSON, 2004).

A estimativa precisa de componentes de variância e parâmetros funcionais, como herdabilidades e correlações genéticas, é crucial, uma vez que variações significativas entre os valores estimados e reais podem aumentar o erro de previsão dos efeitos aleatórios (NISHIO; ARAKAWA, 2022).

Correlações e análise de trilha

A análise de correlação é uma ferramenta estatística amplamente utilizada no melhoramento genético de plantas, pois permite identificar associações entre características agronômicas. Por meio dessa análise, é possível estimar o grau de relação linear entre pares de caracteres, fornecendo informações importantes para a seleção indireta de genótipos superiores. Entretanto, a correlação simples não distingue efeitos diretos de indiretos, o que pode resultar em interpretações equivocadas durante o processo de seleção (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2014). Os coeficientes de correlação fenotípica são calculados a partir das variâncias e covariâncias dos caracteres, conforme metodologia descrita por Cruz et al. (2012).

Para superar essa limitação, a análise de trilha, proposta por Wright (1921), decompõe os coeficientes de correlação em efeitos diretos e indiretos, permitindo uma compreensão mais

precisa das relações causais entre variáveis. Dessa forma, torna-se possível identificar quais caracteres exercem influência direta sobre a produtividade, por exemplo, proporcionando subsídios mais confiáveis para a seleção de genótipos (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2014).

Estudos em diversas culturas evidenciam a relevância da análise de trilha. Em milho superdoce, Entringer et al. (2019) observaram que o volume de grãos e o volume de espiga apresentaram efeitos diretos significativos sobre a produtividade de espigas, sendo considerados critérios confiáveis de seleção. Em feijão preto, Coimbra et al. (1998) identificaram que o peso de mil grãos, o número de vagens por planta e o número de grãos por vagem apresentaram elevados efeitos diretos e alta correlação fenotípica com o rendimento de grãos. No maracujazeiro, Negreiros et al. (2006) verificaram que o número de frutos foi o caráter de maior efeito direto sobre a produção, enquanto a massa da polpa apresentou relevância secundária na explicação das variações produtivas.

No caso da goiabeira, Kherwar e Usha (2016) destacam que a correlação entre caracteres bioativos nem sempre reflete a real contribuição de cada um para a atividade antioxidante. A análise de trilha revelou que pectina, antocianinas, licopeno, sólidos solúveis totais (TSS) e açúcares não-redutores possuem efeitos diretos positivos, enquanto o ácido ascórbico, apesar de correlação positiva, apresentou efeito direto negativo. Esses achados sugerem que programas de melhoramento devem priorizar caracteres com efeito direto significativo, em vez de se basear unicamente em correlações simples.

Além disso, estudos com as variedades Allahabad Safeda, Sau, Ghosh e Sarkar (2016) avaliaram o impacto da aplicação de micronutrientes sobre características de crescimento e produção da goiabeira. Os resultados indicaram que o rendimento de frutos apresentou correlações positivas e significativas com diversos caracteres, incluindo número de frutos por árvore, retenção de frutos, comprimento de brotos, peso fresco e seco das folhas, novas folhas por broto e área foliar. A análise de trilha demonstrou que os caracteres com maior efeito direto sobre o rendimento foram número de frutos por árvore, retenção de frutos e peso fresco da folha, apontando-os como determinantes críticos para a produtividade.

É importante salientar que a multicolinearidade entre variáveis explicativas pode comprometer a confiabilidade das estimativas na análise de trilha. Para mitigar esse problema, técnicas como regressão em crista têm sido empregadas, estabilizando as estimativas e garantindo resultados mais robustos (BORGES et al., 2011). A identificação e correção da multicolinearidade constituem etapas essenciais para assegurar a validade das inferências obtidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBROSIO, M. et al. Repeatability coefficient, stability, and adaptability estimates for S1 progenies of *Psidium guajava* using mixed models. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 45, e-502, 2023.
- ANGULO-LÓPEZ, J. E. et al.. Guava (*Psidium guajava* L.) fruit and valorization of industrialization by-products. **Processes**, v. 9, n. 6, art. 1075, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9061075>
- ANDRADE J, V. C. et al. Repeatability and heritability of production traits in strawberry fruits. **Brazilian Horticulture**, v. 38, p. 89–93, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620200114>
- ACQUAAH, G. Principles of Plant Genetics and Breeding. 2. ed. **Oxford: Wiley-Blackwell**, 2012. ISBN 978-0-470-66476-6.
- AUGUSTA, I. M. et al. Teor de antocianinas totais e atividade antioxidante da casca de jambo vermelho (*Syzygium malaccensis*). **Higiene Alimentar**, v. 27, n. 218/219, p. 1631-1634, 2013.
- AHLINDER, J. et al. Principal component analysis revisited: fast multitrait genetic evaluations with smooth convergence. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkae228>
- ASUERO, A. G. ; MORETTO, L. D. Antocianinas e ciências farmacêuticas. **Revista UpPharma**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 39–41, nov./dez. 2021. Disponível em: <https://cienciasfarmaceuticas.org.br/wp-content/uploads/2021/12/REVISTA-UPPHARMA-ANTOCIANINAS-E-CI%C3%80NCIAS-FARMACEUTICAS-Nov-Dez-2021.pdf>
- BAKRY, F. et al., Genetic improvement of banana. In: Breeding Plantation Tree Crops: Tropical Species. **New York: Springer**, 2009. p. 3–50. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-387-71201-7_1
- BEZERRA, C. M. et al. Guava breeding via full-sib family selection: conducting selection cycle and divergence between parents and families. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, n. 1, p. e256520112, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n1a12>.

- BRIDLE, P. & C.F. TIMBERLAKE, Anthocyanins As Natural Food Colours—Selected Aspects. **Food Chemistry**, 1997. 58(1): P. 103-109
- BOBBIO, P.A.; BOBBIO, F.O. Química Do Processamento De Alimentos: Pigmentos. 2ª Ed., **Campinas: Varela**, 1995, P 105-120.
- BORDIGNON J.R., C. L. et al. Influência do pH da solução extrativa no teor de antocianinas em frutos de morango. **Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas**, v. 27, n. 1, p. 42–45, jan./mar. 2007. ISSN 0101-2061. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612009000100028>
- BORGES, V. et al. Correlações genotípicas e análise de trilha em famílias de meios-irmãos de couve de folhas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 46, n. 10, p. 1207–1213, 2011.
- BOWMAN, K. D.; MCCOLLUM, G.; SEYMOUR, D. K. Genetic modulation of Valencia sweet orange field performance by 50 rootstocks under huanglongbing-endemic conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1061663, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1061663>
- BRIDLE, P.; TIMBERLAKE, C.F. Anthocyanins As Natural Food Colours – Selected Aspects. **Food Chemistry**, V.58, N.1-2, P.103-109, 1997.
- BROUILLARD, R. Em Anthocyanins as food colors; Markakis, P., ed.; Academic Press: New York, 1982, cap. 1.
- BORGES, V. et al. Desempenho genotípico de linhagens de arroz de terras altas utilizando metodologia de modelos mistos., **Bragantia Campinas**, v. 69, n. 4, p. 833–842, dez. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000400008>
- CASTAÑEDA-OVANDO, A. et al. Chemical studies of anthocyanins: a review. **Food Chemistry**, Oxford, v. 113, n. 4, p. 859–871, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.001>.
- CAPISTRANO, M. C. et al. Repeatability of quantitative characteristics in sweet orange through mixed-model methodology. **Comunicata Scientiae**, v. 16, e4203, 2025
- CAZZONELLI, C. I. Carotenoids in nature: insights from plants and beyond. **Functional Plant Biology**, v. 38, n. 11, p. 833–847, 2011. DOI: [10.1071/FP11192](https://doi.org/10.1071/FP11192).

CARDOSO, L. M.; LEITE, J. P. V.; PELUZIO, M. C. G. Efeitos biológicos das antocianinas no processo aterosclerótico. **Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas**, Bogotá, v. 40, n. 1, 2011.

CHEN, B. H; INBARAJ, B. S. Nanoemulsion and nanoliposome based strategies for improving anthocyanin stability and bioavailability. **Nutrients, Basel**, v. 11, n. 5, art. 1052, 10 maio 2019. DOI: [10.3390/nu11051052](https://doi.org/10.3390/nu11051052).

COSTA, C. S. R. et al. Repeatability coefficient for fruit quality and selection of mango hybrids using REML/BLUP analysis . **Euphytica**, v. 219, p. 120, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-023-03249-3>.

CLEMENT, C. R. et al. Origin and domestication of native Amazonian crops. **Diversity, Basel**, v. 2, n. 1, p. 72–106, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/d2010072>

CESA, S. et al. Evaluation of processing effects on anthocyanin content and colour modifications of blueberry (*Vaccinium* spp.) extracts: comparison between HPLC-DAD and CIELAB analyses. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, [s. l.], v. 56, n. 1, p. 102-107, 2011.

CISSE, M. et al. Aqueous extraction of anthocyanins from *Hibiscus sabdariffa*: experimental kinetics and modeling. **Journal of Food Engineering**, v. 109, n. 1, p. 16-21, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.012>

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. Modelos Biométricos Relativos Ao Melhoramento Genético. 4.Ed. Viçosa: Ufv, 2012. 514p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Volume 2. 3.^a ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa – Editora UFV, 2014. 668 p. ISBN 978-85-7269-515-2.

CUSTÓDIO-MENDOZA, J. A. et al. A review of quantitative and topical analysis of anthocyanins in food. **Molecules**, Basel, v. 29, n. 8, art. 1735, 11 abr. 2024. DOI: [10.3390/molecules29081735](https://doi.org/10.3390/molecules29081735).

DE LUNA, S.L.; RAMÍREZ-GARZA, R.E.; SALDÍVAR, S.O.S. Environmentally friendly methods for flavonoid extraction from plant material: Impact of their operating conditions on yield and antioxidant properties. **Sci. World J.** 2020, 2020, 6792069.

DIAZ-DE-CERIO, et al. The hypoglycemic effects of guava leaf (*Psidium guajava*L.) extract are associated with improving endothelial dysfunction in mice with diet induced obesity. **Food Research International**. 2017,96,64–71. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.03.019>

DORNAS, W. C. et al. *Flavonóides: potencial terapêutico no estresse oxidativo*. Ouro Preto: Departamento de Química, UFOP; Viçosa: Departamento de Bioquímica e Biologia Molecular, UFV, 2008. Recebido em 10 set. 2007; aceito em 18 mar. 2008.

DOHM, M. R. Interpretando estimativas de repetibilidade: as estimativas de repetibilidade nem sempre estabelecem um limite superior para a herdabilidade. **Functional Ecology, Oxford**, v. 16, n. 3, p. 273-280, abr. 2002. Blackwell Science Ltd. DOI: 10.1046/j.0269-8463.2002.00600

ENARU, B. et al. Anthocyanins: Factors Affecting Their Stability and Degradation. **Antioxidants**, v. 10, n. 12, art. 1967, 2021. DOI: [10.3390/antiox10121967](https://doi.org/10.3390/antiox10121967).

EMAM, Y. et al. Metabolomics in guava: a comprehensive review of quality, agricultural traits, composition, and nutraceutical applications of *Psidium guajava* fruits and byproducts. **Phytochemistry Reviews**, v. (online) — open DOI: [Phytochem Rev https://doi.org/10.1007/s11101-025-10153-2](https://doi.org/10.1007/s11101-025-10153-2)

EL-MESERY, H. S.; MAO, H.; ABOMOHRA, A. E. Applications of Non-destructive Technologies for Agricultural and Food Products Quality Inspection. **Pub Med MDPI Sensors, Basel**, v. 19, n. 4, art. 846, 18 fev. 2019. DOI: [10.3390/s19040846](https://doi.org/10.3390/s19040846).

ENTRINGER, G. C. et al. Correlação e análise de trilha para componentes de produção de milho superdoce. **Revista Ceres**, v. 61, n. 3, p. 356–361, 2014. DOI:10.1590/0034-737X201461030001

FALCONER, D. S. Introduction to Quantitative Genetics. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1960.

FRANCIS, F. J. Food colorings: anthocyanins. Critical reviews in food science and nutrition. **Cleveland**, v. 28, n. 4, p. 273-314, 1989.

FREIRE, J. M. Avaliação de compostos funcionais e atividade antioxidante em farinhas de polpa de goiabas. **Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal**, v. 34, n. 3, p. 847–852, set. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452012000300026>

FINKELSTEIN, R. Absciscic acid synthesis and response. **The Arabidopsis Book**, v. 11, e0166, 2013. DOI: [10.1199/tab.0166](https://doi.org/10.1199/tab.0166).

FULEKI, T.; FRANCIS, F. J. Extração e determinação de antocianina total em cranberries. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 33, n. 1, p. 72-77, 1968

GROTEWOLD, E. The genetics and biochemistry of floral pigments. **Annual Review of Plant Biology**, v. 57, p. 761–780, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105248>.

GONZAGA N. L. Produção de goiaba. Fortaleza: Instituto de Desenvolvimento da Fruticultura e Agroindústria – FRUTAL, 2007. 64 p. Publicado nos Anais da 14ª Semana Internacional da Fruticultura, Floricultura e Agroindústria – FRUTAL, 10 a 13 de setembro de 2007, Centro de Convenções do Ceará, Fortaleza – CE.

HARBORNE, J. B. Em *Phytochemistry*; Miller, L. P., ed.; Van Nostrand Reinhold Company: New York, 1973, vol. 2.

HARBORNE, J. B., WILLIAMS A.C. (2000). Advances In Flavonoid Research Since 1992. **Phytochemistry**, 55, Pp. 401 – 504.

HARBORNE, J. B., The Flavonoids: Recent Advances, In: **Plant Pigments, Academic Press**, London, 1988, P.298–343

HAIDA, K. S. et al. Phenolic Compounds and Antioxidant Activity of Fresh and Frozen Guava (*Psidium Guajava* L.). **Revista Fitos**, 9(1): 1-72, 2015.

HOLDEN, J. M. et al. Carotenoid content of U.S. foods: an update of the database. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 12, p. 169–196, 1999. Disponível em: <http://www.idealibrary.com>

HOLTON, T. A.; CORNISH, E. C. Genetics and biochemistry of anthocyanin biosynthesis. **The Plant Cell**, v. 7, n. 7, p. 1071–1083, jul. 1995. DOI: <https://doi.org/10.1105/tpc.7.7.1071>.

IBGE. Produção Agrícola – Lavoura Permanente. Disponível Em <https://Cidades.Ibge.Gov.Br/Brasil/Ba/Pesquisa/15/11954?Localidade1=261110&Localidade2=0>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção agropecuária: goiaba. Rio de Janeiro: IBGE, [2024]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/goiaba/br>

HUSSAIN, S. Z. et al. Guava (*Psidium guajava*): Morphology, Taxonomy, Composition and Health Benefits n book: **Fruits Grown in Highland Regions of the Himalayas, Nutritional and Health Benefits** (pp.257-267). 2021. Capítulo 20. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-75502-7_20.

IORIZZO, M. et al. Carrot Anthocyanins Genetics And Genomics: Status and Perspectives To Improve Its Application For The Food Colorant Industry. **Genes (Basel)** V. 11, N. 8, P. 1-15, 2020.

JAIN, S. M; PRIYADARSHAN, P. M. (ed.). Breeding Plantation Tree Crops: Tropical Species. **New York: Springer Science+Business Media**, 2009. ISBN 978-0-387-71199-7.

KAREEM, A. T.; KADHIM, E. J. Psidium guajava: a review on its pharmacological and phytochemical constituents. **Biomedical & Pharmacology Journal**, v. 17, n. 2, p. 1079–1090, jun. 2024. DOI: [10.13005/bpj/2924](https://doi.org/10.13005/bpj/2924).

KHOO, H. E. et al. Anthocyanidins and anthocyanins: Colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. **Food Nutr. Res.** 2017, 61, 1361779.

LAFOUNTAIN, A. M.; YUAN, Y. W. Repressors of anthocyanin biosynthesis. **New Phytologist**, [S.l.], v. 231, n. 3, p. 933–949, 2021. DOI: [10.1111/nph.17397](https://doi.org/10.1111/nph.17397).

LEES, D. H.; FRANCIS, F. J. Standardization of pigment analyses in cranberries. **HortScience**, v. 7, n. 1, p. 83–84, 1972

LIMA, A. J. B. et al Anthocyanins, pigment stability and antioxidant activity in jabuticaba [*Myrciaria cauliflora* (Mart.) O. Berg] **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. 4, p. 877–884, 2011

LI, D.T., Et Al. Health Benefits Of Anthocyanins And Molecular Mechanisms: Update From Recent Decade. **Critical Reviews In Food Science And Nutrition**, 2017. 57(8): P. 1729-1741

LICHTENTHALER, H. K. The 1-deoxy-D-xylulose-5-phosphate pathway of isoprenoid biosynthesis in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, p. 47–65, 1999. DOI: [10.1146/annurev.arplant.50.1.47](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.47).

LINUS PAULING INSTITUTE. Carotenoids. Oregon State University, Micronutrient Information Center, 2021. Disponível em: [Linus Pauling Institute – Carotenoids](https://lpi.oregonstate.edu/Menu/Carotenoids)

LYNCH M, WALSH B. (1998) Genetics and quantitative trait analysis Sinauer, Sun Derby, MA, Vol. 1

LÓPEZ-LÁZARO, M. Flavonoids as Anticancer Agents: Structure-Activity Relationship Study. **Curr. Med. Chem.**, V.2, P.691-714, 2002.

LU, S.; LI, Li. Carotenoid metabolism: biosynthesis, regulation, and beyond. *Journal of Integrative Plant Biology*, [S.l.], v. 50, n. 7, p. 778–785, 2008. DOI: [10.1111/j.1744-7909.2008.00708.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2008.00708.x).

MARAN, J. P.; PRIYA, B.; MANIKANDAN, S. Modeling and optimization of supercritical fluid extraction of anthocyanin and phenolic compounds from Syzygium cumini fruit pulp. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 10, p. 1938-1946, 2014.

MACCARONE, E.; MACCARRONE, A.; RAPISARDA, P. Stabilization of anthocyanins of blood orange fruit juice. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 3, p. 725-726, 1988.

MARÇO, et al. Analytical procedures for identifying anthocyanins in natural extracts. **Química Nova**, v. 31, n. 5, p. 1270–1278, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000500051>

MENZEL, C. M. (1985). Guava: An exotic fruit with potential in Queensland. **Queensland Agricultural Journal**, March–April, 83–86.

Multiple Functional Roles of Anthocyanins In Plant-Environment Interactions. *Environmental And Experimental Botany*, 2015. 119: P. 4 - 17

Ministério Da Agricultura, Pecuária E Abastecimento. **Cultivarweb**. 2025. Disponível Em https://Sistemas.Agricultura.Gov.Br/Snpc/Cultivarweb/Cultivares_registradas.Php.

MAIA, M. C. C. et al. Repeatability of quantitative fruit characteristics in elite mango selections. **Agro@mbiente On-line, Boa Vista**, v. 11, n. 1, p. 56-62, jan./mar. 2017.

MATHIAZHAGAN, M. et al. Construction of a high-density linkage map in guava (*Psidium guajava* L.) using genotyping by sequencing and identification of QTLs for leaf, peel, and pulp color in an intervarietal mapping population.. **Frontiers in Plant Science**, Seção Biotecnologia Vegetal, v. 15, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1335715>

MAZZA, G.; BROUILLARD, R. Recent Developments In the Stabilization Of Anthocyanins In **Food Products. Food Chemistry**, V.25, P. 207-225, 1987

MAZZA, G.; MINIATI, E., Anthocyanins In Fruits, Vegetables, And Grains. **Crc Press**, London, 1993, 362 P.

MAIA, E. et al . Application of spatial analysis in the evaluation of selection experiments for Pêra orange tree clones.. **Ciência Rural, Santa Maria**, v. 43, n. 1, p. 8-14, jan. 2013. ISSN 0103-8478

MANFIO, C. E. et al. Repeatability in biometric characteristics of macauba fruit. **Ciência Rural, Santa Maria**, v. 41, n. 1, p. 70–76, jan. 2011. DOI: 10.1590/S0103-84782011000100012

MAIA, M. C. C. et al . Heritability, repeatability, and genetic gains in a cashew breeding population. **Revista Árvore, Viçosa**, v. 40, n. 4, p. 715–722, jul./ago. 2016. DOI: 10.1590/0100-67622016000400015

MANSOUR, H.; NORDHEIM, E. V.; RUTLEDGE, J. J. Estimators of repeatability. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 60, p. 151-156, 1981

MEDEIROS, J. F. et al. Genetic evaluation and selection of cocoa tree clones (Avaliação genética e seleção de clones de cacaueteiro). **Ciência Rural**, v. 52, n. 12, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210433>

MELDAU, D. C. Licopeno. **InfoEscola**. Disponível em: [InfoEscola – Licopeno](#).

MORAIS, L. M. F.; CONCEIÇÃO, G. M.; NASCIMENTO, J. M. Myrtaceae family: morphological analysis and geographic distribution of a botanical collection. **Agrarian Academy**, v.1, n.01, 2014, p. 317.

NAGATA, M.; YAMASHITA, I. Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. **Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi**, v. 39, n. 10, p. 925-928, 1992. DOI: <https://doi.org/10.3136/nskkk1962.39.925>

NAMBARA, E.; MARION-POLL, A. Absciscic acid biosynthesis and catabolism. **Annual Review of Plant Biology**, v. 56, p. 165–185, 2005. DOI: [1146/annurev.arplant.56.03260410.144046](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.03260410.144046).

NEVES, L. G. et al. Evaluation of repeatability in the improvement of passion fruit families. **Revista Ceres, Viçosa**, v. 57, n. 4, p. 480-485, jul./ago. 2010. DOI: 10.1590/S0034-737X2010000400007.

NETO F. J. T. et al. Seleção genética em progênies híbridas de coqueiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 190–196, mar. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000100026>

NEGREIROS, J. R. S. et al. Combined selection, mass selection, and between-and-within selection, path analysis, and repeatability in half-sib progenies of passion fruit (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 29, n. 3, p. 546–549, 2007.

NISHIO, M.; ARAKAWA, A. Performance of the No-U-Turn sampler in estimating multitrait variance components using genomic. **Seleção: Genética e Evolução**, v. 54, n. 51, 2022.

NISAR, N. et al. Carotenoid metabolism in plants. **Molecular Plant**, v. 8, n. 1, p. 68–82, 2015. DOI: [10.1016/j.molp.2014.12.007](https://doi.org/10.1016/j.molp.2014.12.007).

OLIVEIRA, A. M. et al. Compostos Fenólicos, Antociânicos E De Carotenoides Em Polpas De Goiaba (*Psidium Guajava*). Xxiv **Congresso De Iniciação Científica Da Ufpelotas**. Disponível Em https://Cti.Ufpel.Edu.Br/Siepe/Arquivos/2015/Ca_02071.Pdf.

PATEL, S. H. et al. Changepoint analysis: a new approach for revealing animal movements and behaviors from satellite telemetry data. **Ecosphere**, v. 6, n. 12, p. 291, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1890/ES15-00358.1>

PATTERSON, H. D.; THOMPSON, R. Recovery of inter-block information when block sizes are unequal. **Biometrika**, v. 58, n. 3, p. 645-654, 1971.

PERSSON, T.; ANDERSSON, B. Accuracy of single- and multiple-trait REML evaluation of data including non-random missing records. [S.l.], 2004. Disponível em: <https://www.skogforsk.se/>

POMMER, C. V.; OLIVEIRA, O. F.; SANTOS, C. A. F. Goiaba Recursos Genéticos E Melhoramento. 1. Ed. Mossoró: Ufersa. V. 1. P. 126, 2013.

QUINTAL, S. S. V. et al. Análise de estruturas de covariância e repetibilidade em população segregante de goiabeira. **Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 1, p. 1-11, 2017.

JIANG, Y. et al . Extraction and synthesis of typical carotenoids: lycopene, β -carotene, and astaxanthin. **Molecules**, v. 29, n. 19, p. 4549, 2024. DOI: 10.3390/molecules29194549.

- KANG, J. et al. Protective effects of lycopene against zearalenone-induced reproductive toxicity in early pregnancy through anti-inflammatory, antioxidant and anti-apoptotic effects. **Food and Chemical Toxicology**, v. 179, p. 113936, set. 2023. DOI: 10.1016/j.fct.2023.113936.
- KEARSLEY, M. W.; RODRIGUEZ, N. The stability and use of natural colours in foods: anthocyanin, β -carotene and riboflavin. **Journal of Food Technology**, v. 16, p. 421-431, 1981. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1981.tb01833.x>
- KONG, J. M., et al.. Analysis and biological activities of anthocyanins. **Phytochemistry**, 64(5), 923–933 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(03\)00438-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(03)00438-2)
- KHACHIK, F. et al. Separation and quantification of carotenoids in human plasma. **Methods in Enzymology**, v. 213, p. 3–26, 1992. DOI: 10.1016/0076-6879(92)13122-E
- IKAN, R.; Natural products – A laboratory guide, Academic Press: London, 1991.
- QUINTAL, S. S. R. Melhoramento da Goiabeira P. Guajava Via Metodologia De Modelos Mistos. Campos Dos Goytacazes-Rj, Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro -Uenf 2013
- RAMEEZ, R. et al. Evaluation of alternative methods for estimating the precision of REML-based estimates of variance components and heritability. **Heredity** (Edinburgh), v. 128, n. 4, p. 197–208, 2022. DOI: 10.1038/s41437-022-00509-1
- RODRÍGUEZ-MENA, L. A. OCHOA-MARTÍNEZ, S. M. GONZÁLEZ HERRERA, O. M. Rutiaga-Quñones, R.F. González-Laredo, B. Olmedilla-Alonso, **Food Chem.** 398, 133908 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133908>
- RODRIGUES S. L. et al. Flavonoids: Chemical Composition, Medicinal Actions, and Toxic Potential. **Acta Toxicológica Argentina**, V.23, N.1, P.36-43, 2015.
- RODRIGUES, E. V. et al. Selection of Jatropha genotypes for bioenergy purpose: an approach with multitrait, multiharvest and effective population size. **Bragantia**, Campinas, v. 79, n. 3, p. 346–355, jul.–set. 2020. DOI: 10.1590/1678-4499.20200046. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200046>
- ROY, A. et al. Flavonoids: a bioactive compound from medicinal plants and its therapeutic applications. **Biomed Research International**, [S.l.], v. 2022, p. 1-9, 2022. DOI: [10.1155/2022/5445291](https://doi.org/10.1155/2022/5445291)

RUIZ-SOLA, M. A; RODRÍGUEZ-CONCEPCIÓN, M. Carotenoid biosynthesis in *Arabidopsis*: a colorful pathway. **The Arabidopsis Book**, v. 10, e0158, 2012. DOI: [1199/tab.0158.10](https://doi.org/10.1199/tab.0158.10).

SAINI, R. K. ; KEUM, Y S. Carotenoid extraction methods: A review of recent developments. **Food Chemistry**, v. 240, p. 90–103, 2018. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.07.099.

ŠAPONJAC, V. T.; et al. Enhancing the effectiveness of accelerated solvent extraction in carrots using experimental design and chemometric techniques. **Processes**, Basel, v. 9, n. 9, art. 1652, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9091652>

SIRIWOHARN, T., WROLSTAD, R. E., FINN, C. E., & PEREIRA, C. B. (2004). Influence of cultivar, maturity, and sampling on blackberry (*Rubus L. hybrids*) anthocyanins, polyphenolics, and antioxidant properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 52(26), 8021–8030.

SILVA, A. L.; MENDES, A.M.S. Coleção Plantar Goiaba. Ed 2. 2007

SILVA, S. N. et al. Genetic Parameters Of Pollen Viability In Guava ('*psidium Guajava*l.). **Australian Journal Of Crop Science**, V. 11, N. 1, P. 1, 2017.

SIMÕES, C. M. O. et al..(Orgs). Farmacognosia: da planta ao medicamento. 6.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS: Florianópolis: Editora da UFSC, 2010.

SINGH, D. et al. Estimativas de variabilidade genética, herdabilidade, avanço genético, coeficientes de correlação e suas perspectivas para o melhoramento da cultura da goiaba (*Psidium guajava L.*). **Revista de Horticultura Aplicada**, v. 17, n. 1, p. 70-75, 2015.

SINGH, D., et al., (2015). Genetic diversity analysis in guava (*Psidium guajava*) on the basis of morphological and physico-chemical traits. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, 85(5), 678–683. <https://doi.org/10.56093/ijas.v85i5.48504>

SEMWAL, D. P.; ,LONGKUMAR,S. CHANDRA,P Analysis of the Distribution of Guava (*Psidium guajava L.*) Population Diversity in Cultivated and Wild Habitats in the Middle Hills of Uttarakhand, India

SANTOS, C. A. F.; COSTA, S. R.; FLORI, J. E Guava Cultivars. In: Freitas, G.B.; Borém, A. (Eds.). Guava: From Planting to Harvesting. 1ed.Vicosa: Ufv, 2021, V. 1, P. 37-56.

SELKOE, K. A.; TOONEN, R. J. Microsatellites for ecologists: a practical guide to using and evaluating microsatellite markers. **Ecology Letters**, v. 9, n. 5, p. 615–629, May 2006. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2006.00889.

SEAPA. Goiaba, Secretaria de estado de agricultura, pecuária e abastecimento, agosto de 2020, Belo Horizonte, 2021.

SENAPATI, R. (2022). Black guava (*Psidium guajava* L.): Morphological, biochemical and molecular characterization for pulp colour. *Anais de Pesquisa de Plantas e Solos*, 24(3), 429–433. <https://doi.org/10.47815/apsr.2022.10187>

SIMON, P.W. Inheritance And Expression Of Purple And Yellow Storage Root Color In Carrot. **Journal Heredity**, V. 87, P. 63-66, 1996.

SILVA, F. A.; VIANA, A. P. Repeatability estimates in longitudinal data of guava trees.. **Biometria**, [S.l.], v. 41, n. 1, p. 1-12, 2023. DOI: [10.1590/1678-992X-2022-0065](https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0065). ISSN 1678-992X.

STRANDÉN, I. et al . Um algoritmo computacionalmente eficiente para alavancar informações médias REML para estimativa do componente de (co)variância na era genômica. **Seleção Genética & Evolução**, v. 56, p. 73, 2024. DOI: 10.1186/s12711-024-00939-x

SONDHEIMER, E.; KERTESZ, Z. I. The anthocyanin of strawberries. **Journal of the American Chemical Society**, v. 70, n. 10, p. 3476–3479, 1948. DOI: 10.1021/ja01190a079.

SOUZA C. G. et al. Ethnopharmacological studies of antimicrobial remedies in the south of Brazil. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 90, n. 1, p. 135–143, 2004. DOI: [10.1016/j.jep.2003.09.039](https://doi.org/10.1016/j.jep.2003.09.039)

SHUKLA R. et al. 2022. Morphological Characterization Of Various Cultivars Of Guava (*Psidium Guajava*. L) Under Western U.P Conditions. **Pharm Innov J** 11 (8): 1846-1848

SHUKLA, S. et al. Quantification of bioactive compounds in guava at different ripening stages. **Food Research**, v. 5, n. 3, p. 183-189, 2021. Disponível em: https://www.myfoodresearch.com/uploads/8/4/8/5/84855864/21_fr-2020-554_shukla_1.pdf

SUN, T. et al. Carotenoid metabolism in plants: the role of plastids. **Molecular Plant**, v. 11, n. 1, p. 58–74, 2018. DOI: [1016/j.molp.2017.09.010](https://doi.org/10.1016/j.molp.2017.09.010).

TÜRKER, N.; ERDOĞDU, F. Effects of pH and temperature of the extraction medium on the effective diffusion coefficient of anthocyanin pigments from black carrot (*Daucus carota* var. L.). **Journal of Food Engineering**, v. 76, p. 579-583, 2006. Disponível em: <http://www.elsevier.com/locate/jfoodeng>

TUMBAS ŠAPONJAC. et al. Improvement of Carrot Accelerated Solvent Extraction Efficacy Using Experimental Design and Chemometric Techniques. **Processes**, v. 9, n. 9, art. 1652, 2021. DOI: 10.3390/pr9091652.

TAN, T. et al. Extraction And Purification Of Anthocyanins: A Review. **Journal Of Agriculture And Food Research**, V. 8, P. 1-8, 2022.

TERAO, J. Revisiting carotenoids as dietary antioxidants for human health and disease prevention. **Food & Function**, v. 14, p. 7799–7814, 2023. DOI: 10.1039/d3fo02330c. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/fo/d3fo02330c>

TUFAIL, T. et al. Nutritional benefits of lycopene and beta-carotene: a comprehensive overview. **Food Science and Nutrition**, 2024.

UDDIN, T. M. et al. Antibiotic resistance in microbes: history, mechanisms, therapeutic strategies and future prospects. **Journal of Infection and Public Health**, v. 14, n. 12, p. 1750–1766, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2021.10.020>

UENOJO, M. et al. Carotenoids: properties, applications and biotransformation for the formation of aroma compounds. **Revista de Ciência de Alimentos**, 2007.

WELCH, C. R.; WU, Q.; SIMON, J. E. Recent advances in the analysis and characterization of anthocyanins. **Current Analytical Chemistry**, v. 4, n. 2, p. 75-101, 2008. DOI: 10.2174/157341108784587795.

WANG, Y. et al. Effect of Regulatory Architecture on Broad versus Narrow Sense Heritability. **PLOS Computational Biology**, v. 9, n. 5, p. e1003053, 2013. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1003053

WADIBHASME, U. et al. Development and evaluation of Jamun (*Syzygium cumini*) fortified “Instant drink mix” by utilizing the spray drying technique. **The Pharma Innovation Journal**, v. 9, n. 4, p. 103-110, 2020. Disponível em: <https://www.thepharmajournal.com/archives/2020/vol9issue4/PartB/9-4-54-738.pdf>

WRIGHT, S. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research**, v. 20, p. 557–585, 1921.

WINKEL-SHIRLEY, B. Flavonoid biosynthesis: a colorful model for genetics, biochemistry, cell biology, and biotechnology. **Plant Physiology**, v. 126, n. 2, p. 485–493, jun. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.126.2.485>.

VIANA A. P, RESENDE M. D. V (2014) Quantitative Genetics in Fruit Tree Breeding. **Interscience**, Rio de Janeiro

VISSCHER, P. M.; HILL, W. G.; WRAY, N R. Heritability in the genomics era — concepts and misconceptions. **Nature Reviews Genetics**, v. 9, n. 4, p. 255–266, 2008. DOI: 10.1038/nrg2322

YUDINA, R. S. et al. (2021). Anthocyanins as functional food components. Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

YU, Z. et al . Beyond t test and ANOVA: applications of mixed-effects models for more rigorous statistical analysis in neuroscience research. **Neuron, Irvine**, v. 109, n. 22, p. 3563-3582, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2021.10.030>

CAPÍTULO 1

PARÂMETROS GENÉTICOS E IDENTIFICAÇÃO DA SEGREGAÇÃO TRANSGRESSIVA PARA OS TEORES DE LICOPENO E ANTOCIANINA EM FRUTOS DE CRUZAMENTOS DE GOIABA (*Psidium guajava*)¹

¹Ribeiro, TS; Freitas, S. T.; Costa, A. C. S. S.; BOITEUX, L S; SANTOS, C.A.F.. Genetic parameters and identification of transgressive segregation for lycopene and anthocyanin contents in fruits from guava () crosses. Journal of Crop Improvement, p. 1-12, 2026.

Resumo

Os frutos da goiaba (*Psidium guajava* L.) são ricos em licopeno e antocianinas, dois compostos bioativos de grande importância para a saúde humana. Neste estudo, estimamos os coeficientes de repetibilidade (r) e herdabilidade em sentido amplo (h^2B) para o teor de licopeno e antocianina em frutos de cruzamentos de goiaba, visando apoiar o desenvolvimento de novas cultivares nutricionalmente ricas. Um total de 225 e 152 progênies de três e dois cruzamentos de goiaba foram avaliadas quanto ao teor de licopeno e antocianina nos frutos, respectivamente, ao longo de três safras. As estimativas de h^2B foram maiores que as de r para todos os métodos, exceto para antocianina na população “Pedro Sato” $\times$ “Purple Guava” (PSR). O aumento no teor de licopeno demonstra maior potencial na população “Pedro Sato” $\times$ “Paluma” (PSP) ($h^2B = 0,94$), em comparação com as demais populações. Para o teor de antocianina, os baixos valores de h^2B indicam dificuldades na melhoria dessa característica tanto na população PSR quanto na PSP. A identificação de segregação transgressiva para licopeno e antocianina (atingindo até 6,12 e 26,75 mg 100 g⁻¹ de peso fresco, respectivamente) sugere a possibilidade de implementação de estratégias de melhoramento baseadas na seleção de progênies/clones individuais que combinem maiores teores de ambos os compostos nutraceuticos.

Palavras-chave: *Psidium guajava*, herdabilidade, repetibilidade, REML, pigmentos

Abstract

Guava (*Psidium guajava* L.) fruits are rich sources of lycopene and anthocyanins, which are two bioactive compounds of major importance for human health. Herein, we estimate the coefficients of repeatability (r) and broad-sense heritability (h^2B) for fruit contents of lycopene and anthocyanin in progenies from guava crosses, aiming to support the development of new nutritionally rich cultivars. A total of 225 and 152 progenies from three and two guava crosses were evaluated for fruit lycopene and anthocyanin contents, respectively, over three harvesting seasons. The estimates of h^2B were higher than those of r for all methods, except for anthocyanin in the population “Pedro Sato” $\times$ “Purple Guava” (PSR). The increase in lycopene content shows greater potential in the population “Pedro Sato” $\times$ “Paluma” (PSP) ($h^2B = 0.94$), compared with the other populations. For anthocyanin content, the low h^2B values indicate difficulties in improving this trait in both PSR and PSP populations. The identification of transgressive segregation for lycopene and anthocyanin (reaching up to 6.12 and 26.75 mg 100 g⁻¹ fresh weight, respectively) suggests the potential implementation of breeding strategies based upon selection of individual progenies/clones combining higher contents of both nutraceutical compounds.

KEYWORDS: *Psidium guajava*; heritability; repeatability; REML; pigments

1 INTRODUÇÃO

A goiaba (*Psidium guajava* L.) é uma espécie frutífera da família Myrtaceae, nativa de regiões tropicais e subtropicais, amplamente reconhecida por seu valor nutricional e propriedades medicinais (Santos et al., 2022). Possui um notável potencial antioxidante e importantes propriedades anti-hipertensivas, antiespasmódicas, antimicrobianas, hipoglicêmicas, analgésicas e anti-inflamatórias (Vasconcelos et al., 2017). Índia, Indonésia, China, México, Paquistão, Brasil, Malawi, Egito e Tailândia, classificados do primeiro ao nono maiores produtores, respectivamente, respondem por quase 80% da produção mundial de goiaba (FAOSTAT, 2025).

A cor da goiaba é um atributo significativo e desempenha um papel essencial na preferência e aceitação do consumidor. Os pigmentos mais comuns em goiabas são flavonoides, como as antocianinas, e carotenoides, como o licopeno (Zheng et al., 2022). Na goiaba, a cor da polpa é determinada principalmente pela proporção relativa dos pigmentos antocianinas (roxo) e licopeno (vermelho) (Bishnoi et al. 2024; Shukla et al. 2025). Do ponto de vista do melhoramento genético, o desenvolvimento de cultivares de goiaba com maiores concentrações de ambos os pigmentos nos frutos é um objetivo primordial, devido aos seus valores nutricionais, nutracêuticos e antioxidantes superiores. Uma dieta rica em licopeno pode ajudar a prevenir ou reduzir o risco de doenças cardiovasculares e certos tipos de câncer. Uma ingestão diária de 5 a 7 mg de licopeno é considerada suficiente para obter seus benefícios à saúde, enquanto quantidades maiores (35 a 75 mg/dia) são recomendadas na presença de câncer ou doenças cardiovasculares (Caseiro et al. 2020). O teor de licopeno na goiaba ($5,10 \pm 0,85$ mg/100 g) é considerado superior ao de outras frutas, como o tomate (*Solanum lycopersicum* L.) ($2,45 \pm 0,14$ mg/100 g) (Nwaichi, Chuku e Oyibo 2015). Por outro lado, diversos estudos indicam que a ingestão regular de antocianinas proporciona vários benefícios à saúde, principalmente devido à sua capacidade de reduzir radicais livres, espécies reativas de oxigênio e marcadores pró-inflamatórios (Gonçalves et al. 2021; Tena, Martín e Asuero 2020). A recomendação de ingestão diária de antocianinas varia de 18,4 a 65 mg/dia na Espanha e na Itália, respectivamente. Na China, a ingestão diária de 50 mg por pessoa já é recomendada para reduzir os níveis de estresse oxidativo e, consequentemente, diminuir o risco de câncer, síndrome metabólica, diabetes, doenças degenerativas e outras patologias (Gonçalves et al., 2021). Estudos anteriores relataram teores de antocianinas (mg 100 g⁻¹ de peso fresco) em algumas cultivares, variando de 0,24 a 0,37 em “Paluma”, 0,821 em “CISH-G-1” e 0,88 em

“Lalit” (Ankad et al., 2023), e 8,401 ($\pm 0,006$) em um genótipo indiano de goiaba roxa (Shukla et al., 2025).

As estimativas de parâmetros genéticos, como a repetibilidade (r) e os coeficientes de herdabilidade, desempenham um papel central como ferramenta para avaliar o desempenho genotípico. Esses parâmetros permitem avaliar a consistência da expressão fenotípica em diferentes épocas de colheita e determinar quanta dessa variação é geneticamente controlada. Tais estimativas orientam o desenvolvimento de cultivares com maior valor agregado, melhor adaptação ambiental e maior potencial para composição de propriedades funcionais (Silva et al. 2023). No entanto, estimativas de herdabilidade em sentido amplo (h^2B) para o acúmulo de licopeno e antocianinas em frutos são escassas no melhoramento da goiaba (Paras et al. 2024). De fato, estimativas de h^2B para os teores de licopeno e antocianinas também são limitadas entre diferentes culturas, com exceção da cenoura (*Daucus carota* subsp. *sativus* L.) (Santos e Simon 2006) e do tomate (Zörb et al. 2020). Neste contexto, o objetivo do presente estudo foi estimar as médias, variâncias, amplitudes e coeficientes de repetibilidade, bem como a herdabilidade em sentido amplo (h^2B) para os teores de licopeno e antocianina em frutos, utilizando progênies de três cruzamentos de goiaba para apoiar o desenvolvimento de novas cultivares nutricionalmente ricas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Material vegetal

O experimento foi conduzido no Campo Experimental de Bebedouro, Embrapa Tropical Semiárido, Petrolina, PE, Brasil (09°09' S, 40°22' O e 365 m de altitude). Três populações de goiaba foram utilizadas nas avaliações. Essas populações foram obtidas a partir de cruzamentos manuais entre as seguintes cultivares comerciais: “Pedro Sato” $\times$ “Goiaba Roxa” (PSR) ($n = 94$), “Pedro Sato” $\times$ “Paluma” (PSP) ($n = 64$) e “Paluma” $\times$ “Goiaba Roxa” (PR) ($n = 67$). As cultivares parentais “Paluma”, “Pedro Sato” e “Goiaba Roxa” (Figura 1) foram incluídas entre as progênies como controles e para os cálculos de herdabilidade. As hibridizações foram confirmadas por marcadores fenotípicos para garantir a autenticidade dos cruzamentos. As plantas segregantes e parentais foram enxertadas em campo no porta-enxerto “BRS Guaraçá”, resistente a nematoides das galhas (Santos et al. 2022). O espaçamento entre as plantas foi de 4,0 m $\times$ 2,5 m, com irrigação por gotejamento e manejo da cultura realizados de acordo com as recomendações comerciais. A colheita e a avaliação dos frutos foram conduzidas ao longo de três safras consecutivas, de 2023 a 2025. As colheitas foram realizadas de acordo com o estágio

de maturação de cada planta, seguindo as recomendações comerciais, coletando-se de cinco a oito frutos por indivíduo no estágio de maturação 3 (50% maduros).

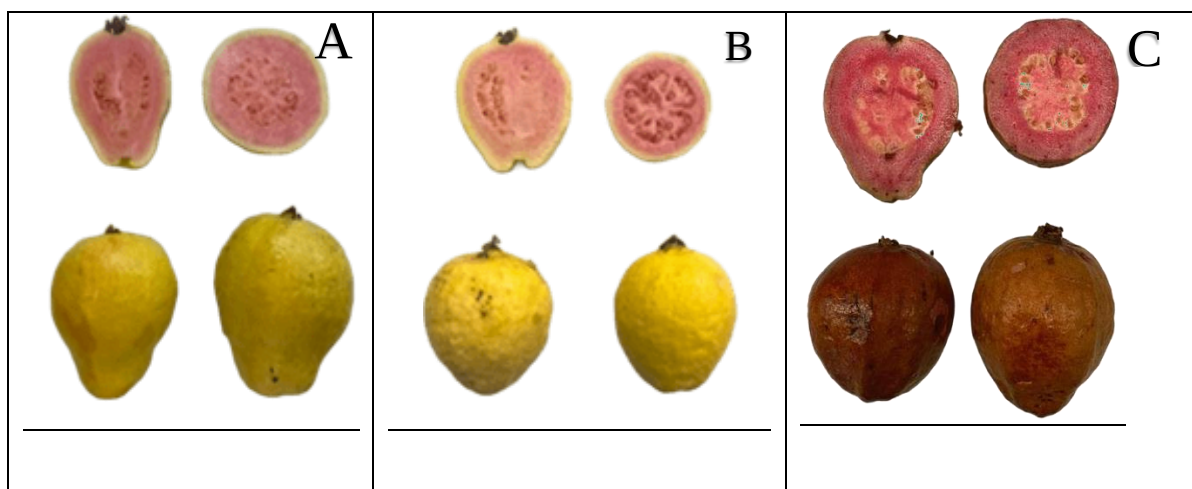


Figura 1. Frutos das cultivares de goiabeira ‘Paluma’ (A), ‘Pedro Sato’ (B) e ‘Goiaba Roxa’ (C).

Análises do teor de licopeno em frutos de goiaba

Após a colheita, os frutos individuais de cada amostra foram colocados em sacos de papel e transportados para o Laboratório de Genética Vegetal para avaliação de pigmentos. A quantificação do licopeno seguiu o protocolo descrito por Nagata e Yamashita (1992): (1) 10 g de polpa foram congelados a -80°C ; (2) 1 g de polpa foi dissolvido em 10 mL de uma solução de extração de acetona + hexano (4:6, v/v) e homogeneizado por 1 min; (3) uma amostra do sobrenadante foi lida em 663, 645, 505 e 453 nm. O teor de licopeno foi calculado da seguinte forma: $\text{Licopeno (mg/100 g de peso fresco)} = [(-0,0458 \times A_{663}) + (0,204 \times A_{645}) + (0,372 \times A_{505}) - (0,0806 \times A_{453})] \times 10$. O teor de licopeno foi avaliado em frutos das três populações. Os tamanhos das amostras para a avaliação do licopeno foram de 200, 349 e 187 frutos das populações PR, PSR e PSP, respectivamente, ao longo das três safras. Os tamanhos das amostras para a avaliação do licopeno das cultivares parentais “Paluma”, “Pedro Sato” e “Purple Guava” foram de 16, 37 e 13 frutos, respectivamente.

Análises do teor de antocianinas em frutos de goiaba

A quantificação de antocianinas foi realizada em condições de ausência de luz e baixa temperatura para evitar a oxidação da amostra, seguindo o método descrito por Fuleki e Francis (1968): (1) 2 g de polpa foram dissolvidos em 20 mL de uma solução extratora de etanol + ácido clorídrico (85:15, v/v) e homogeneizados por 1 min; (2) a solução foi transferida para um balão volumétrico de 25 mL e completada com a solução extratora; (3) o extrato foi colocado em um frasco de vidro âmbar e armazenado em freezer a 6°C por 18 h; (4) 1,0 mL do extrato foi

diluído para 10 mL com a mesma solução de etanol + ácido clorídrico, homogeneizado e a absorbância foi lida em um espectrofotômetro a 535 nm. O teor de antocianinas foi calculado da seguinte forma: Antocianinas (mg 100 g – 1 de peso fresco) = $((\text{absorbância} \times 250)/98,2) \times 50$, ajustado para 100 g de fruta. O fator de diluição (FD) de 250 foi obtido como $\text{FD} = (25 \text{ mL}/1 \text{ mL}) \times 10 \text{ mL}$. A antocianina foi quantificada em duas populações (PSR e PR). Os tamanhos das amostras para antocianinas foram de 189 e 248 indivíduos de PR e PSR, respectivamente, ao longo das três safras. Os tamanhos das amostras para avaliação de antocianinas para as cultivares parentais “Goiaba Roxa”, “Paluma” e “Pedro Sato” foram de 15, 15 e 22, respectivamente.

Análises estatísticas dos teores de licopeno e antocianina

Médias, variâncias, valores mínimos e máximos e testes de normalidade para os teores de licopeno e antocianina nas progênies dos dois ou três cruzamentos e nas cultivares parentais foram estimados utilizando os procedimentos PROC UNIVARIATE e PROC MEANS do software estatístico SAS (SAS Institute 2025). Uma análise de variância (PROC GLM) foi realizada para avaliar a divergência entre as cultivares parentais. As estimativas dos componentes de variância para ambas as características nos dois ou três cruzamentos foram obtidas utilizando o procedimento PROC VARCOMP (SAS Institute 2025).

Os coeficientes de repetibilidade foram estimados utilizando seis métodos implementados no software Genes (Cruz 1998) e um método adicional baseado em componentes de variância REML. A herdabilidade em sentido amplo (h^2B , segundo uma fórmula adaptada de Burton (1951): h^2B) foi estimada de acordo com a fórmula: $h^2B = \text{variância genética}/\text{variância fenotípica}$, onde $\text{variância genética} = \text{variância da progênie} - ((\text{variância do progenitor 1} + \text{variância do progenitor 2})/2)$, e $\text{variância fenotípica} = \text{variância da progênie}$. Os dados transformados em $\log_2(10)$ foram utilizados para a estimativa de h^2B . Essa abordagem pressupõe que toda a variância parental seja de origem ambiental, enquanto a variância da progênie inclui componentes genéticos e ambientais.

Resultados

Análises do teor de licopeno em frutos de goiaba

Os dados originais para o teor de licopeno nas progênies dos cruzamentos “Paluma” $\times$ “Goiaba Roxa” (PR), “Pedro Sato” $\times$ “Goiaba Roxa” (PSR) e “Pedro Sato” $\times$ “Paluma” (PSP) apresentaram desvios significativos da curva de distribuição normal, de acordo com os testes de Kolmogorov-Smirnov e Cramer-von Mises, bem como valores de curtose diferentes de zero

(Tabela 1). Após a transformação logarítmica na base 10, os testes de normalidade não foram significativos e os valores de curtose ficaram próximos de zero para PR e PSR (Tabela 1), enquanto PSP ainda apresentou desvio significativo e curtose $> 1,0$ (Tabela 1). Os teores médios de licopeno nas cultivares parentais foram de 3,59, 2,64 e 3,11 mg 100 g⁻¹ de peso fresco para “Paluma”, “Pedro Sato” e “Purple Guava”, respectivamente, mostrando diferenças significativas entre “Paluma” e “Purple Guava” em comparação com “Pedro Sato” (Tabela 1).

Os teores máximos de licopeno entre as progênes, em uma única safra, foram de 6,18, 5,13 e 7,24 mg 100 g⁻¹ de peso fresco para PR, PSR e PSP, respectivamente. Nas cultivares parentais, os valores máximos foram de 5,40, 4,86 e 4,90 mg 100 g de peso fresco para “Paluma”, “Pedro Sato” e “Purple Guava”, respectivamente (Tabela 1). As dez progênes com os maiores teores médios de licopeno (mg 100 g⁻¹ de peso fresco) foram PSP065 (6,12), PSP018 (5,61), PSP061 (5,56), PSP072 (5,52), PSP016 (5,29), PSR007 (5,20), PSP051 (5,18), PSP038 (5,08), PSP036 (4,95) e PSP039 (4,88) (Figura Suplementar S1), indicando segregação transgressiva (teores de pigmento superiores às médias parentais). As progênes PR com os maiores valores de licopeno foram PR031 (3,71), PR009 (3,66) e PR001 (3,60), enquanto em PSR os maiores valores foram PSR007 (5,20), PSR021 (4,20) e PSR014 (3,54).

Tabela 1. Testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (KS), Cramer-von Mises (CvM) e curtose para dados originais e transformados em Log10, médias, variâncias e amplitude (valores máximo e mínimo) das progênes (n = número de avaliações) dos cruzamentos “Paluma” × “Goiaba Roxa” (PR), “Pedro Sato” × “Goiaba Roxa” (PSR) e “Pedro Sato” × “Paluma” (PSP), e plantas parentais (“Paluma”, “Pedro Sato” e “Goiaba Roxa”) avaliadas quanto ao teor de licopeno (mg 100 g⁻¹ de peso fresco) e teor de antocianina (mg 100 g⁻¹ de peso fresco) em frutos de goiaba.

Licopeno						
Progenies – avaliações	PR (n=200)		PSR (n=349)		PSP (=187)	
Testes de normalidade	Original	Log10	Original	Log10	Original	Log10
1. Kolmogorov-Smirnov	0.119**	0.067*	0.08**	0.03ns	0.106**	0.178**
2. Cramer-von Mises	0.660**	0.102ns	0.70**	0.09ns	0.005**	1.824**
3. Kurtosis	1.01	0.08	0.76	0.96	-1.01	1.75
Média	2.29	0.301	1.95	0.24	2.78	0.18
Variância	1.383	0.052	0.826	0.046	4.37	0.422
Amplitude – mínima	0.39	-0.41	0.19	0.72	0.008	-2.08
Amplitude – máxima	6.18	0.79	5.13	0.71	7.24	0.86
Parentais	‘Paluma’ (=16)		‘Pedro Sato’ (n=37)		‘Purple Guava’ (n=13)	
Média	3.59 ^A	0.53	2.64 ^B	0.38	3.11 ^A	0.47

Variância	1.28	0.021	1.01	0.027	1.12	0.026
Amplitude – mínima	1.84	0.26	0.99	-0.003	1.63	0.21
Amplitude – máximo	5.40	0.74	4.86	0.697	4.90	0.641
Antocianina						
Progenies – avaliações	PR (n=189)			PSR (n=248)		
Teste de normalidade	Original		Log10	Original		Log10
1. Kolmogorov-Smirnov	0.118**		0.055ns	0.159**		0.047ns
2. Cramer-von Mises	0.806**		0.121ns	1.870**		0.058ns
3. Kurtosis	1.17		-0.30	3.73		-0.19
Media	8.39		0.822	9.50		0.879
Variância	32.77		0.096	46.26		0.088
Amplitude- mínima	1.08		0.034	1.132		0.054
Amplitude -máxima	32.99		1.518	38.53		1.585
Parentais	Roxa (n=15)		'Paluma' (n=15)	'Pedro Sato' (n=22)		
Media	9.37 ^A	0.93	6.51 ^B	0.75	6.40 ^B	0.74
Variância	18.65	0.04	8.90	0.061	11.18	0.063
Amplitude – mínima	3.61	0.57	1.655	0.218	2.1	0.322
Amplitude – máximo	11.88	1.314	10.807	1.033	11.56	1.062

**, * e ns = significativos nos níveis de probabilidade de 1% e 5% e não significativos, respectivamente, para os testes de normalidade. As médias das plantas parentais seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade.

Análises do teor de licopeno em frutos de goiaba

Para o teor de antocianinas, os dados originais das populações PR e PSR também apresentaram desvios significativos da normalidade (Tabela 1), enquanto os dados transformados por log10 exibiram testes de normalidade não significativos e valores de curtose próximos de zero (Tabela 1). Testes de normalidade não significativos e valores de curtose próximos de zero indicam uma distribuição de probabilidade normal (SAS Institute 1989) e adequação para a estimativa de parâmetros genéticos. Os teores médios de antocianinas foram de 6,51, 6,40 e 9,37 mg 100 g⁻¹ de peso fresco para “Paluma”, “Pedro Sato” e “Goiaba Roxa”, respectivamente, com diferenças significativas entre “Goiaba Roxa” e as outras duas cultivares (Tabela 1).

Os teores máximos de antocianinas entre as progênies, em uma única safra, foram de 32,99 e 38,53 mg 100 g⁻¹ de peso fresco para PR e PSR, respectivamente. Para as cultivares parentais, os valores máximos foram de 10,81, 11,56 e 11,88 mg 100 g de peso fresco para “Paluma”, “Pedro Sato” e “Purple Guava”, respectivamente (Tabela 1). As dez progênies com os maiores teores médios de antocianina (mg 100 g⁻¹ de peso fresco) foram PSR043 (26,75), PSR101 (24,48), PSR004 (23,62), PSR105 (23,10), PSR088 (22,53), PSR052 (21,18), PSR095 (20,52), PSR081 (18,26), PSR003 (17,98) e PSR096 (17,48) (Dados suplementares), indicando

também segregação transgressiva nessas progênies. As progênies PR com os maiores valores de antocianina foram PR020 (16,45) e PR068 (16,43).

Estimativas de repetibilidade para licopeno e antocianina

Os coeficientes de repetibilidade (r) para o licopeno, em sete métodos de estimativa, variaram de 0,111 a 0,221, de 0,253 a 0,414 e de 0,744 a 0,815 para as populações PR, PSR e PSP, respectivamente. As maiores estimativas de r foram obtidas usando o método de componentes principais – correlação (0,221) para PR, o método de componentes de variância REML – VARCOMP SAS (0,414) para PSR e o método de componentes principais – covariância (0,815) para PSP (Tabela 2).

Os coeficientes de repetibilidade (r) para a antocianina, em sete métodos de estimativa, variaram de 0,172 a 0,331 para PR e de 0,189 a 0,396 para PSR. As maiores estimativas de r foram obtidas usando o método de componentes principais – covariância (0,331) para PR e o método de componentes de variância REML – VARCOMP SAS (0,396) para PSR (Tabela 2).

Estimativas de herdabilidade em sentido amplo para licopeno e antocianina

As estimativas de herdabilidade em sentido amplo (h^2B) para o licopeno foram moderadas e semelhantes para PR (0,55) e PSR (0,59), e altas para PSP (0,94) (Tabela 2). O alto valor de h^2 observado em PSP foi atribuído à presença de plantas com polpa branca e, conseqüentemente, níveis de licopeno próximos de zero, aumentando a variância genética entre as progênies. Por outro lado, as estimativas de herdabilidade em sentido amplo (h^2B) para antocianina foram moderadas em PR (0,42) e baixas em PSR (0,28) (Tabela 2).

Tabela 2. Estimativas de repetibilidade (r), coeficiente de determinação (R^2) e herdabilidade em sentido amplo para dados transformados em Log10 de progênies dos cruzamentos “Paluma” × “Goiaba Roxa” (PR), “Pedro Sato” × “Goiaba Roxa” (PSR) e “Pedro Sato” × “Paluma” (PSP), avaliadas quanto ao teor de licopeno (mg 100 g⁻¹ de peso fresco) e teor de antocianina (mg 100 g⁻¹ de peso fresco) em frutos de goiaba.

Licopeno						
1. Repetibilidade						
Método de estimativa (r)	PR		PSR		PSP	
	r	R^2	R	R^2	r	R^2
ANOVA – Modelo (1)	0.199	42.6	0.253	50.3	0.749	90.0
ANOVA – Modelo (2)	0.111	27.3	0.205	43.6	0.744	89.7

Componentes de variância – REML Varcomp SAS	0.220	46.9	0.414	64.3	0.740	86.1
Componente principal – covariância	0.216	45.2	0.264	51.8	0.815	93.0
Componente principal – correlação	0.221	46.0	0.256	50.7	0.782	91.5
Análise estrutural – correlação	0.205	43.6	0.255	50.7	0.782	91.5
Análise estrutural – covariância	0.199	42.6	0.253	50.3	0.749	90.0
2. Hereditariedade em sentido amplo (h² _B)	0.55		0.59		0.94	
Antocianina						
1. Repetibilidade	PR		PSR			
Método de estimativa (r)	r		R²		r	
ANOVA – Modelo (1)	0.189		41.1		0.198	
ANOVA – Modelo (2)	0.181		39.9		0.189	
Componentes de variância – REML Varcomp SAS	0.272		52.2		0.396	
Componente principal – covariância	0.331		59.7		0.298	
Componente principal – correlação	0.196		42.2		0.243	
Análise estrutural – correlação	0.172		38.4		0.225	
Análise estrutural – covariância	0.189		41.1		0.198	
2. Hereditariedade em sentido amplo (h² _B)	0.42				0.28	

Discussão

O licopeno e a antocianina são dois compostos bioativos presentes em diferentes genótipos de goiaba e são importantes para a saúde humana devido às suas funções antioxidantes nas células, entre outras funções fisiológicas (Gonçalves et al. 2021; Khan et al. 2021; Tena, Martín e Asuero 2020). Diferenças significativas entre cultivares parentais são um pré-requisito para a estimativa de parâmetros genéticos como herdabilidade e repetibilidade. Essa informação é crucial para o desenvolvimento de novas cultivares com níveis elevados desses compostos. No entanto, tais estimativas ainda são escassas em muitas espécies vegetais, particularmente em frutíferas como a goiaba, que apresentam um longo período juvenil e grande porte, tornando a avaliação e a seleção mais complexas.

No presente estudo, apenas os dados de licopeno da população PSP (“Pedro Sato” e “Paluma”) não se ajustaram à distribuição normal após a transformação, devido à presença de seis plantas recombinantes de polpa branca com valores de licopeno próximos de zero, apesar de ambos os genitores apresentarem polpa vermelha. Métodos de estimativa de repetibilidade, como ANOVA e abordagens baseadas em correlação, pressupõem uma distribuição normal;

portanto, a transformação de dados é comumente aplicada para atender a essa premissa, frequentemente resultando em estimativas de repetibilidade razoáveis (Nakagawa e Schielzeth 2010). O método de componentes de variância e o método de componentes principais apresentaram os maiores coeficientes de repetibilidade em comparação com outras abordagens, particularmente a ANOVA. De acordo com Rutledge (1974), métodos baseados em componentes principais são mais apropriados quando ocorrem flutuações entre as avaliações, por exemplo, devido a inconsistências de medição. Nas populações PR e PSR, os coeficientes de repetibilidade para licopeno e antocianina foram baixos, indicando consistência limitada nas quantificações e um alto número de medições necessárias para estimar com precisão o valor genético de um indivíduo em um determinado coeficiente de determinação (R^2). Em contraste, na população PSP, o alto coeficiente de repetibilidade (0,815) obtido pelo método de componentes principais-covariância sugere que um número reduzido de avaliações seria suficiente para estimar os valores genéticos.

As estimativas de herdabilidade obtidas neste estudo foram geralmente superiores aos coeficientes de repetibilidade entre os métodos, com exceção da antocianina na população PSR. Este resultado contrasta com Falconer e Mackay (1996), que afirmaram que a repetibilidade representa um limite superior para a razão entre as variâncias genética e fenotípica (h^2B). Paras et al. (2024) relataram valores de herdabilidade de 0,60 e 0,91 para licopeno e antocianina, respectivamente, em goiaba avaliada em condições subtropicais indianas, que concordam apenas com as estimativas de licopeno do presente estudo.

A segregação transgressiva para o licopeno indica um potencial promissor para a seleção de progênies com altos teores do composto. As cinco progênies de goiaba apresentaram médias (mg 100 g⁻¹ de peso fresco) – PSP065 (6,12), PSP018 (5,61), PSP061 (5,56), PSP072 (5,52) e PSP016 (5,29) – superiores às relatadas por Nwaichi, Chuku e Oyibo (2015) ($5,10 \pm 0,85$) e Correa et al. (2011) (4,04). A segregação transgressiva para licopeno também foi relatada em tomate (Chaerunnisa et al. 2024) e cenoura (Hadagali et al. 2021). Da mesma forma, a segregação transgressiva observada para o teor de antocianina indica potencial para a seleção de progênies com níveis superiores desse fitoquímico. As cinco melhores progênies, PSR043 (26,75), PSR101 (24,48), PSR004 (23,62), PSR105 (23,10) e PSR088 (22,53), superaram os valores parentais de “Paluma” (0,821; Ankad et al. 2023) e da goiaba roxa indiana (8,401; Shukla et al. 2025).

O potencial para aumentar o teor de licopeno foi maior na população PSP ($h^2 = 0,94$), em comparação com PR ($h^2 = 0,55$) e PSR ($h^2 = 0,59$). Em contraste, as estimativas de

herdabilidade da antocianina ($h^2 = 0,42$ e $0,28$ para PR e PSR, respectivamente) indicam maior dificuldade em obter ganhos genéticos para esse composto. Segundo Burton (1951), a estimativa de herdabilidade derivada da fórmula adaptada utilizada neste estudo apresenta um viés para cima, representando um valor máximo de herdabilidade, uma vez que a variância genética (variância de F1 – variância dos genitores) inclui a variância genética total (efeitos aditivos, desvios de dominância e interações epistáticas), bem como as interações genótipo $\times$ ambiente. Além disso, os genótipos parentais utilizados aqui não são linhagens puras para os compostos avaliados e podem conter variabilidade genética substancial.

Conclusões

As estimativas de herdabilidade em sentido amplo (h^2B) foram superiores a todas as estimativas de coeficiente de repetibilidade, exceto para antocianina na população “Pedro Sato” $\times$ “Goiaba Roxa” (PSR). O melhoramento do licopeno apresenta o maior potencial na população PSP ($h^2B^{-1} = 0,94$), enquanto os baixos valores de herdabilidade para antocianina indicam potencial limitado para ganhos genéticos nas populações “Paluma” $\times$ “Goiaba Roxa” e “Pedro Sato” $\times$ “Goiaba Roxa”.

A segregação transgressiva para licopeno e antocianina indica oportunidades promissoras para a seleção de progênies com altos teores, atingindo até $6,12 \text{ mg } 100 \text{ g}$ de peso fresco para licopeno em PSP e $26,75 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ de peso fresco para antocianina em PSR. A identificação da segregação transgressiva para licopeno e antocianina sugere a potencial implementação de estratégias de melhoramento genético baseadas na seleção de progênies/clones individuais que combinem maiores teores de ambos os compostos nutraceuticos. Esses achados destacam o potencial da hibridização como estratégia para aprimorar o perfil de compostos bioativos na goiaba e contribuir para o desenvolvimento de cultivares com maior valor nutricional e funcional.

REFERÊNCIA

- Ankad, H., A. Dhillon, M. Thakre, R. Senapati, R. Kumar, G. N. Deepak, N. Arumugam, M. K. Verma, G. S. Krishnan, and A. Mithra. 2023. “Breeding for Pulp Colour in Guava: Current Status and Opportunities.” *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 99 (2): 130–145. <https://doi.org/10.1080/14620316.2023.2251995>.
- Bishnoi, P., M. Thakre, P. Maurya, S. Jagga, N. D. Gangappa, A. Nagaraja, M. K. Verma, S. G. Krishnan, E. Varghese, and A. M. Sevanthi. 2024. “Pulp Colour and Pigment Composition Have

- No Genetic Correlation with Seed Hardness in Guava (*Psidium guajava* L.).” *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 100 (2): 233–246. <https://doi.org/10.1080/14620316.2024.2392090>.
- Burton, G. W. 1951. “Quantitative Inheritance in Pearl Millet (*Pennisetum glaucum*) 1.” *Agronomy Journal* 43 (9): 409–417. <https://doi.org/10.2134/agronj1951.00021962004300090001x>.
- Caseiro, M., A. Ascenso, A. Costa, J. Creagh-Flynn, M. Johnson, and S. Simões. 2020. “Lycopene in Human Health.” *LWT* 127:127. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109323>.
- Chaerunnisa, A. N. J., M. Farid, M. F. A. Nasaruddin, and J. Messa. 2024. “Transgressive Segregant of Tomato F4 Populations Based on Fruit Yield and Lycopene Content.” *SABRAO Journal of Breeding and Genetics* 56 (1): 129–141. <https://doi.org/10.54910/sabrao2024.56.1.12>.
- Correa, L. C., C. A. F. Santos, F. Vianello, and G. P. P. Lima. 2011. “Antioxidant Content in Guava (*Psidium guajava*) and Brazilian Guava (*Psidium* spp.) Germplasm from Different Brazilian Regions.” *Plant Genetic Resources: Characterisation and Utilisation* 9 (3): 384–391. <https://doi.org/10.1017/S1479262111000025>.
- Cruz, C. D. 1998. “Programa GENES- Aplicativo Computacional em Estatística Aplicada à Genética (GENES – Software for Experimental Statistics in Genetics).” *Genetics and Molecular Biology* 21 (1): 135–138. <https://doi.org/10.1590/S1415-47571998000100022>.
- Falconer, D. S., and T. F. C. Mackay. 1996. *Introduction to Quantitative Genetics*. 4th ed. Harlow: Pearson Education.
- FAOSTAT. 2025. Crops and livestock products [accessed on December 2025]. Available at <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- Fuleki, T., and F. J. Francis. 1968. “Quantitative Methods for Anthocyanins. II. Determination of Total Anthocyanin and Degradation Index for Cranberry Juice.” *Journal of Food Science* 33 (1): 78–83. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1968.tb00888.x>
- Gonçalves, A. C., A. R. Nunes, A. Falcão, G. Alves, and L. R. Silva. 2021. “Dietary Effects of Anthocyanins in Human Health: A Comprehensive Review.” *Pharmaceuticals* 14 (7): 690. <https://doi.org/10.3390/ph14070690>.
- Hadagali, S. M., S. S. Cholin, B. M. Chandan, S. Evoor, D. S. Ambika, and B. B. Patil. 2021. “Studies on Inbreeding Depression, Transgressive Segregation, Genetic Variability and Heritability in F2 Segregating Population of Tropical Carrot (*Daucus carota* L.).” *The Pharma Innovation Journal* 10 (8): 1345–1350.

- Khan, U. M., M. Sevindik, A. Zarrabi, M. Nami, B. Ozdemir, D. N. Kaplan, Z. Selamoglu, et al. 2021. "Lycopene: Food Sources, Biological Activities, and Human Health Benefits." *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* 2021 (1): 2713511. <https://doi.org/10.1155/2021/2713511>.
- Nagata, M., and I. Yamashita. 1992. "Simple Method for Simultaneous Determination of Chlorophyll and Carotenoids in Tomato Fruit." *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology* 39 (10): 925–928. <https://doi.org/10.3136/nsk1962.39.925>.
- Nakagawa, S., and H. Schielzeth. 2010. "Repeatability for Gaussian and Non-Gaussian Data: A Practical Guide for Biologists." *Biological Reviews* 85 (4): 935–956. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2010.00141.x>.
- Nwaichi, E. O., L. C. Chuku, and N. J. Oyibo. 2015. "Profile of Ascorbic Acid, Beta-Carotene and Lycopene in Guava, Tomatoes, Honey and Red Wine." *International Journal of Current Microbiology & Applied Sciences* 4 (2): 39–43.
- Paras, K. K., G. Singh, G. Kaur, and J. S. Brar. 2024. "Heritability and Principal Component Analysis of Phytochemical Traits in Guava Under Indian Subtropics." *Applied Fruit Science* 66 (1): 193–202. <https://doi.org/10.1007/s10341-023-01012-5>.
- Rutledge, J. J. 1974. "A Scaling which Removes Bias of Abeywardena's Estimator of Repeatability." *Journal of Genetics* 61:247–250. <https://doi.org/10.1007/BF02986435>.
- Santos, C. A. F., S. R. Costa, L. S. Boiteux, D. Grattapaglia, and O. B. Silva-Junior. 2022. "Genetic Associations with Resistance to *Meloidogyne enterolobii* in Guava (*Psidium* sp.) Using Cross-Genera SNPs and Comparative Genomics to Eucalyptus Highlight Evolutionary Conservation Across the Myrtaceae." *PLOS ONE* 17 (11): e0273959. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273959>.
- Santos, C. A. F., and P. W. Simon. 2006. "Heritabilities and Minimum Gene Number Estimates of Carrot Carotenoids." *Euphytica* 151 (1): 79–86. <https://doi.org/10.1007/s10681-006-9130-7>.
- SAS Institute. 1989. *SAS/STAT User's Guide, Version 6. 4th ed. Vol. 2*. Cary: SAS Institute Inc. SAS Institute. 2025.
- SAS Institute Inc. SAS® OnDemand for Academics, Cary, NC, USA: SAS Institute Inc. <https://welcome.oda.sas.com>.
- Shukla, H. V., A. Kumar, S. S. Maan, S. Thakur, N. K. Arora, G. Kaur, S. P. S. Solanki, et al. 2025. "Positional Mapping – Constitutive Purple Trait Locus (pl) in Guava (*Psidium guajava*

- L.) in F2 and BC1F1 Populations of Purple Local × Allahabad Safeda.” *Physiologia Plantarum* 177 (2): e70212. <https://doi.org/10.1111/ppl.70212>.
- Silva, F. A., A. P. Viana, C. C. G. Corrêa, L. S. D. S. Leal, and L. S. Glória. 2023. “Repeatability Estimates in Longitudinal Data on Guava Trees.” *Scientia Agricola* 80: e20220065. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0065>.
- Tena, N., J. Martín, and A. G. Asuero. 2020. “State of the Art of Anthocyanins: Antioxidant Activity, Sources, Bioavailability, and Therapeutic Effect in Human Health.” *Antioxidants* 9 (5): 451. <https://doi.org/10.3390/antiox9050451>.
- Vasconcelos, A. G., A. G. N. Amorim, R. C. Santos, J. M. T. Souza, L. K. M. Souza, T. S. L. Araújo, L. A. D. Nicolau, et al. 2017. “Lycopene Rich Extract from Red Guava (*Psidium guajava* L.) Displays Anti-Inflammatory and Antioxidant Profile by Reducing Suggestive Hallmarks of Acute Inflammatory Response in Mice.” *Food Research International* 99:959–968. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.01.017>.
- Zheng, B., Q. Zhao, H. Wu, X. Ma, W. Xu, L. Li, Q. Liang, and S. Wang. 2022. “Metabolomics and Transcriptomics Analyses Reveal the Potential Molecular Mechanisms of Flavonoids and Carotenoids in Guava Pulp with Different Colors.” *Scientia Horticulturae* 305:111384. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111384>.
- Zörb, C., H. P. Piepho, S. Zikeli, and B. Horneburg. 2020. “Heritability and Variability of Quality Parameters of Tomatoes in Outdoor Production.” *Research* 2020:6707529. <https://doi.org/10.34133/2020/6707529>

CAPÍTULO 2

ESTIMATIVAS DE CORRELAÇÕES E ANÁLISES DE TRILHA PARA ANTOCIANINAS E LICOPENO EM POPULAÇÕES DE GOIABEIRA²

RESUMO

A compreensão dos fatores que regulam o acúmulo de pigmentos bioativos em goiabeira é fundamental para orientar estratégias de melhoramento voltadas à qualidade nutricional dos frutos. Este estudo teve como objetivo estimar correlações fenotípicas entre 11 variáveis físico-químicas em progênies provenientes dos cruzamentos ‘Paluma’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PR), ‘Pedro Sato’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PSR) e ‘Pedro Sato’ × ‘Paluma’ (PSP), além de particionar essas correlações em efeitos diretos por meio de análise de trilha, considerando licopeno e antocianinas como variáveis dependentes. O experimento foi conduzido no Campo Experimental de Bebedouro, da Embrapa Semiárido (Petrolina, PE), com avaliações realizadas ao longo de três ciclos de frutificação. Foram mensuradas características físicas e químicas dos frutos. Na análise conjunta das três populações, PR, PSR e PSP, correlações positivas significativas foram estimadas para licopeno x peso médio do fruto (0,123), licopeno x comprimento do fruto (0,097), licopeno x diâmetro do fruto (0,126), licopeno x firmeza (0,081), licopeno x casca polpa (0,105) e licopeno x betacaroteno (0,336) e estimativas negativas significativas de licopeno x sólidos solúveis (-0,154) e licopeno x vitamina C (- 0,108). Na análise conjunta de todas as progênies PR, PSR e PSP, efeitos diretos em licopeno foram significativos positivos para a relação firmeza (0,097) e betacaroteno (0,323) e significativos negativos para sólidos solúveis (-0,140). Para antocianinas as estimativas das correlações foram não significativas para todas as variáveis na população PR, significativas negativas entre antocianinas x comprimento do fruto (-0,112) e correlação não significativas para as demais variáveis na população PSR. Na análise conjunta de todas as progênies PR e PSR, todos os efeitos para antocianinas foram significativos.

Palavras-chaves: *Psidium guajava*; compostos bioativos; pigmentos

ABSTRACT

Understanding the factors that regulate the accumulation of bioactive pigments in guava trees is fundamental to guiding breeding strategies focused on the nutritional quality of the fruits. This study aimed to estimate phenotypic correlations between 11 physicochemical variables in progenies from the crosses ‘Paluma’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PR), ‘Pedro Sato’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PSR), and ‘Pedro Sato’ × ‘Paluma’ (PSP), as well as to partition these correlations into direct effects through path analysis, considering lycopene and anthocyanins as dependent variables. The experiment was conducted at the Bebedouro Experimental Field of Embrapa Semiárido (Petrolina, PE), with evaluations carried out over three fruiting cycles. Physical and chemical characteristics of the fruits were measured. In the combined analysis of the three populations, PR, PSR, and PSP, significant positive correlations were estimated for lycopene x average fruit weight (0.123), lycopene x fruit length (0.097), lycopene x fruit diameter (0.126), lycopene x firmness (0.081), lycopene x peel-pulp (0.105), and lycopene x β -carotene (0.336), and significant negative estimates for lycopene x soluble solids (-0.154) and lycopene x vitamin C (-0.108). In the combined analysis of all progenies PR, PSR, and PSP, direct effects on lycopene were significantly positive for the firmness (0.097) and beta-carotene (0.323) relationship and significantly negative for soluble solids (-0.140). For anthocyanins, correlation estimates were not significant for all variables in the PR population, negatively significant between anthocyanins and fruit length (-0.112), and non-significant correlations for the other variables in the PSR population. In the combined analysis of all PR and PSR progenies, all effects for anthocyanins were significant.

Keywords: *Psidium guajava*; bioactive compounds; pigments.

1 INTRODUÇÃO

A goiabeira (*Psidium guajava* L.) destaca-se como uma das espécies frutíferas mais expressivas das regiões tropicais e subtropicais, amplamente valorizada tanto pelo consumo in natura quanto pelo emprego medicinal tradicional. Valor nutricional elevado tem motivado seu enquadramento entre as chamadas “superfrutas”, em razão da expressiva concentração de vitamina C, em níveis superiores aos encontrados na maior parte das frutas amplamente comercializadas, e da presença de compostos bioativos relevantes, como carotenoides e antocianinas (KHERWAR & USHA, 2016). Esses constituintes conferem à espécie elevado potencial antioxidante, além de propriedades anti-hipertensivas, antiespasmódicas, antimicrobianas, hipoglicemiantes, analgésicas e anti-inflamatórias (VASCONCELOS et al., 2017).

A coloração da casca e da polpa é um atributo de grande importância para a aceitabilidade do consumidor. As mais de 400 variedades cultivadas mundialmente evidenciam ampla diversidade cromática, determinada principalmente pela composição e pelo acúmulo de pigmentos, entre os quais se destacam flavonoides, como as antocianinas, e carotenoides, especialmente o licopeno (MAURYA et al., 2025; ZHENG et al., 2022). A dinâmica de biossíntese desses pigmentos está intimamente associada ao processo de maturação, que envolve alterações fisiológicas e bioquímicas moduladas por fatores ambientais e pela constituição genética dos genótipos (KAPOOR et al., 2022). Essas mudanças são essenciais para a definição do estado fisiológico do fruto, impactando diretamente sua qualidade pós-colheita, vida útil e potencial de armazenamento (BELWAL et al., 2019; SOLOVCHENKO et al., 2019).

Entre os compostos presentes na goiaba, o licopeno merece destaque pelos efeitos benéficos relacionados à redução do risco de doenças cardiovasculares e certos tipos de câncer, sendo estimado que ingestões diárias entre 5 e 7 mg sejam suficientes para promover tais benefícios, podendo-se alcançar de 35 a 75 mg/dia em condições patológicas específicas (CASEIRO et al., 2020). Comparativamente, frutos de goiaba apresentam teores mais elevados de licopeno ($5,10 \pm 0,85$ mg/100 g) que os observados em tomate cru ($2,45 \pm 0,14$ mg/100 g) (NWAICHI et al., 2015). A goiaba também se destaca por seus altos níveis de vitamina C, variando de 200 a 400 mg/100 g de polpa, influenciados pelo genótipo, pelo estágio de maturação e pelas condições de cultivo (FRAGA, 2017; CERQUEIRA et al., 2020). A vitamina C cumpre funções fisiológicas indispensáveis, incluindo a síntese de colágeno, a absorção de

ferro, a regeneração da vitamina E e a modulação da resposta imune (ANTUNES, 2019; SILVA, 2017).

Além de definirem a aparência e o valor nutricional, os pigmentos desempenham papel estratégico no metabolismo do fruto, contribuindo para o acúmulo de carbono, para a atividade antioxidante e para sua utilização industrial (KAPOOR et al., 2022). Outros atributos físico-químicos, como os sólidos solúveis totais (SST) e a acidez titulável (AT), são parâmetros essenciais para caracterização da qualidade, uma vez que refletem, respectivamente, o teor de açúcares e a concentração de ácidos orgânicos presentes na polpa.

No contexto do melhoramento de frutíferas, análises estatísticas multivariadas se tornam indispensáveis para compreender as relações entre características e orientar a seleção de genótipos superiores. As análises de correlação auxiliam na identificação de associações entre variáveis, embora não permitam distinguir efeitos diretos de efeitos indiretos, o que pode limitar a precisão das inferências (CRUZ et al., 2014). Para contornar essa limitação, a análise de trilha, proposta por Wright (1921), decompõe os coeficientes de correlação em efeitos diretos e indiretos, possibilitando a identificação de relações causais e contribuindo para maior eficácia na seleção de caracteres agrônômicos relevantes (CRUZ et al., 2014). Essas ferramentas têm se mostrado fundamentais para direcionar estratégias de seleção voltadas ao incremento da qualidade físico-química e do conteúdo de compostos bioativos em programas de melhoramento.

O objetivo do presente estudo foi estimar correlações fenotípicas entre 11 variáveis físico-químicas em progênies de três cruzamentos de goiabeira, desdobrando as correlações em efeitos diretos em diagrama causal, considerando licopeno e antocianinas como variáveis dependentes (endógenas) e as demais variáveis como independentes (exógenas), para orientar na seleção e desenvolvimento de novas cultivares de goiabeira.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material vegetal e análises físico-químicas

O experimento foi conduzido no Campo Experimental de Bebedouro, pertencente à Embrapa Semiárido, localizado em Petrolina, PE. Foram avaliadas duas populações para antocianina e três populações de goiabeira para carotenoides, obtidas a partir de cruzamentos manuais entre cultivares comerciais: ‘Pedro Sato’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PSR) (n = 94), ‘Pedro Sato’ × ‘Paluma’ (PSP) (n = 64) e ‘Paluma’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PR) (n = 67). As hibridações foram confirmadas por meio de marcadores fenotípicos, assegurando a autenticidade dos

cruzamentos. As plantas segregantes e parentais foram enxertadas no campo no porta-enxerto ‘BRS Guaraçá’, resistente ao nematoide-das-galhas. O espaçamento entre plantas foi de 4,0 m x 2,5 m, com irrigação por gotejamento e manejo adotado para plantios comerciais na região, incluindo podas de formação e frutificação.

As avaliações foram realizadas ao longo de três ciclos de frutificação consecutivos, nos anos de 2023 a 2025. A colheita dos frutos ocorreu de acordo com o estágio de maturação em cada planta, sendo coletados de cinco a oito frutos em estágio 3 (50% maduro) por indivíduo. Após a coleta, os frutos foram acondicionados em sacos de papel devidamente identificados e transportados ao Laboratório de Genética Vegetal da Embrapa Semiárido para as análises físicas e químicas.

Foram mensuradas as seguintes características físicas dos frutos: produção por planta (PTO) = estimada pela multiplicação do número total de frutos pelo peso médio (PMF); PMF = média de cinco a oito frutos/planta, em balança semi-analítica; número de frutos por planta (NFP) = contabilizado durante as colheitas; comprimento (COF) e o diâmetro (DIF) = determinados com auxílio de paquímetro digital na amostra de até oito frutos; firmeza = avaliada com o uso de penetrômetro, realizando duas leituras em lados opostos do fruto (quilograma-força - kgf); peso das sementes (Pseed) = obtido após lavagem, secagem e pesagem em balança analítica; peso da polpa e casca (C+P) = estimado pela diferença entre o peso médio do fruto e sementes.

As características químicas avaliadas foram: sólidos solúveis totais (SST) = determinados em refratômetro manual e expressos em °Brix; Acidez Titulável (AT) = por titulação com NaOH 0,1 N e expressa em porcentagem de ácido cítrico (Correa et al., 2011); vitamina C (VitC) = determinada pelo método de Tillmans (CORREA et al., 2011), com duas repetições por amostra, em mg/100 g de polpa fresca; β -caroteno (beta) e licopeno (lico) foram estimadas em espectrofotômetro, utilizando equações específicas para cada pigmento (Nagata & Yamashita, 1992); antocianina (anto) = por espectrofotometria a 535 nm após extração alcoólica ácida (TAN et al. (2022)). O teor de antocianina foi obtida pela seguinte equação: anto = ((absorbância * 250) / 98,2) * 50, ajustando para 100 g de fruto. O fator de diluição (FD) de 250 foi obtido por FD = 25 ml/1mL * 10mL. As estimativas de antocianinas foram efetuadas para as populações PSR e PR.

2.2 Análises estatísticas

As onze variáveis avaliadas foram combinadas em todos os pares possíveis para a obtenção das estimativas de correlações de Pearson (fenotípicas) nas progênies dos três cruzamentos, PR, PSR e PSP, além de uma análise conjunta envolvendo todas as progênies. A significância dos coeficientes foi testada pelo método *t* ao nível de 5% de probabilidade, sendo todos os procedimentos conduzidos por meio do procedimento PROC CORR do SAS University (SAS, 2025).

Para a análise de trilha, elaborou-se um diagrama causal no qual os teores de licopeno e de antocianinas foram definidos como variáveis dependentes (endógenas), enquanto as demais características físico-químicas foram tratadas como variáveis independentes (exógenas). As análises foram realizadas individualmente para cada cruzamento e, adicionalmente, considerando o conjunto total das progênies. Utilizou-se a matriz de correlações obtida via PROC CORR como base para os modelos de trilha.

A determinação dos efeitos diretos, assim como os testes de ajuste dos modelos (*modeling info*), foi efetuada por meio do PROC CALIS (SAS, 2025). Os testes *t* de Student aplicados aos efeitos diretos também foram gerados pelo PROC CALIS. Os efeitos indiretos sobre as variáveis dependentes não foram apresentados, considerando que o foco principal da análise de trilha é a quantificação dos efeitos diretos exercidos por cada variável explicativa.

3 RESULTADOS

3.1 Análises de correlações em três populações segregantes de goiabeira

Na população ‘Pedro Sato’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PSR) as estimativas dos coeficientes de correlações foram positivas significativas para β -caroteno x licopeno (0,263) e as demais correlações com licopeno foram não significativas (Tabela 1). Na população ‘Paluma’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PR) correlações positiva significativas foram estimadas para licopeno x produção total (0,145), licopeno x peso médio do fruto (0,209), licopeno x comprimento do fruto (0,170), licopeno x diâmetro do fruto (0,249), licopeno x acidez (0,131), licopeno x firmeza (0,151), licopeno x casca+polpa (0,195) e licopeno x b-Caroteno (0,370) e estimativas negativas significativas de licopeno x sólidos solúveis (-0,143) e licopeno x vitamina C (-0,155) (Tabela 1).

Tabela 1. Estimativas dos coeficientes de correlação fenotípica para licopeno e antocianina pelo método de ‘máxima verossimilhança’ usando o procedimento PROC CALIS no SAS entre 12 características de progênies pseudo F2 dos cruzamentos ‘Paluma’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PR) (acima da diagonal principal) e ‘Pedro Sato’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PSR) (abaixo da diagonal principal).

PR \ PSR	PTO	PMF	COF	DIF	SST	ACI	VIT	FIR	C+P	BET	LIC	ANT
PTO		0.225**	0.183**	0.187**	-0.280**	0.112ns	-0.234**	-0.208**	0.227**	0.008ns	0.145*	0.001ns
PMF	0.294**		0.789**	0.887**	0.021ns	0.066ns	-0.121*	-0.096ns	0.988**	0.023ns	0.209**	-0.040ns
COF	0.219**	0.840**		0.722**	-0.004ns	0.043ns	-0.055ns	-0.093ns	0.760**	-0.030ns	0.170**	-0.009ns
DIF	0.169**	0.710**	0.643**		-0.016ns	0.081ns	-0.237**	-0.040ns	0.849**	0.076ns	0.249**	-0.027ns
SST	-0.167**	-0.042ns	-0.013ns	-0.047ns		0.112ns	0.285**	0.008ns	0.048ns	-0.062ns	-0.143*	-0.046ns
ACI	0.008ns	0.039ns	0.035ns	0.066ns	0.002ns		-0.080ns	0.040ns	0.036ns	-0.011ns	0.131*	-0.057ns
VIT	-0.151**	-0.164**	-0.061ns	-0.171**	0.297**	0.032ns		0.021ns	-0.098ns	-0.234**	-0.155**	-0.078ns
FIR	-0.261**	-0.125**	-0.039ns	-0.059ns	0.148**	0.179**	0.103*		-0.093ns	-0.066ns	0.151**	0.079ns
C+P	0.271**	0.987**	0.829**	0.687**	-0.004ns	0.032ns	-0.139**	-0.124**		-0.007ns	0.195**	-0.005ns
BET	-0.027ns	0.105*	0.084ns	0.072ns	0.040ns	-0.014ns	-0.098*	-0.043ns	0.125*		0.370**	0.091ns
LIC	0.067ns	0.049ns	0.022ns	0.056ns	-0.082ns	-0.054ns	-0.004ns	-0.059ns	0.051ns	0.263**		0.026ns
ANT	0.067ns	-0.090ns	-0.112*	-0.061ns	-0.058ns	-0.049ns	-0.005ns	0.006ns	-0.100ns	-0.051ns	-0.010ns	

PTO = produção por planta (kg); PMF = peso médio do fruto por planta; COF = comprimento do fruto; DIF = diâmetro do fruto; SST = sólidos solúveis totais; ACI = acidez; VIT = vitamina C; FIR = firmeza; C+P = peso da casca e da polpa; BET = β -caroteno; LIC = licopeno; e ANT = antocianina. *, ** e ns: significativo nos níveis de probabilidade de 5%, 1% e não significativo, respectivamente, de acordo com o teste t.

Na população ‘Pedro Sato’ × ‘Paluma’ (PSP) correlações positivas significativas foram estimadas para licopeno x peso médio do fruto (0,193), licopeno x comprimento do fruto (0,133), licopeno x diâmetro do fruto (0,214), licopeno x firmeza (0,144), licopeno x casca+polpa (0,152) e licopeno x b-Caroteno (0,430) e estimativas negativas significativas de licopeno x sólidos solúveis (0,199) e licopeno x vitamina C (0,210) (Tabela 2). Na análise conjunta das três populações, PR, PSR e PSP, correlações positivas significativas foram estimadas para licopeno x peso médio do fruto (0,123), licopeno x comprimento do fruto (0,097), licopeno x diâmetro do fruto (0,126), licopeno x firmeza (0,081), licopeno x casca+polpa (0,105) e licopeno x b-Caroteno (0,336) e estimativas negativas significativas de licopeno x sólidos solúveis (-0,154) e licopeno x vitamina C (-0,108)

Para antocianinas as estimativas das correlações foram não significativas para todas as variáveis na população PR (Tabela 1), significativas negativas entre antocianinas x comprimento do fruto (-0,112) e correlações não significativas para as demais variáveis na população PSR (Tabela 1), enquanto no conjunto das duas populações, PR e PSR, correlações negativas positivas foram estimadas antocianinas x peso médio do fruto (-0,094), antocianinas x comprimento do fruto (-0,114) e antocianinas x casca+polpa (-0,093) (Tabela 2).

Tabela 2. Estimativas dos coeficientes de correlação fenotípica para licopeno pelo método de ‘máxima verossimilhança’ usando o procedimento PROC CALIS no SAS entre 12 características de progênies pseudo F2 dos cruzamentos ‘Pedro Sato’ × ‘Paluma’ (PSP) (acima da diagonal principal) e todas as progênies dos cruzamentos ‘Paluma’ × ‘Goiabeira Roxa’, ‘Pedro Sato’ × ‘Goiabeira Roxa’ e ‘Pedro Sato’ × ‘Goiabeira Roxa’. (abaixo da diagonal principal).

ALL \	PSP	PTO	PMF	COF	DIF	SST	ACI	VIT	FIR	C+P	BET	LIC
PTO			-0.049ns	-0.178**	-0.056ns	-0.113*	0.055ns	-0.017ns	-0.005ns	-0.092ns	-0.016ns	0.012ns
PMF		0.210**		0.702**	0.885**	-0.023ns	-0.006ns	-0.114*	-0.011ns	0.978**	0.068ns	0.193**
COF		0.091**	0.776**		0.651**	0.028ns	-0.014ns	-0.056ns	0.068ns	0.689**	0.076ns	0.133*
DIF		0.153**	0.786**	0.638**		-0.067ns	-0.006ns	-0.154**	-0.011ns	0.866**	0.113*	0.214**
SST		-0.111**	0.012ns	0.027ns	-0.014ns		0.222**	0.149**	0.100ns	0.001ns	-0.084ns	-0.199**
ACI		-0.005ns	0.030ns	0.045ns	0.045ns	0.043ns		-0.095ns	0.093ns	-0.035ns	-0.009ns	-0.058ns
VIT		-0.109**	-0.135**	-0.071*	-0.170**	0.261**	-0.014ns		-0.053ns	-0.091ns	-0.143*	-0.210**
FIR		-0.190**	-0.099**	-0.037ns	-0.057ns	0.078*	0.132**	0.045ns		-0.023ns	0.077ns	0.144**
C+P		0.191**	0.984**	0.763**	0.761**	0.044ns	0.018ns	-0.111**	-0.103**		0.068ns	0.152**
BET		-0.019ns	0.062*	0.030ns	0.074*	-0.026ns	-0.032ns	-0.122**	0.003ns	0.062*		0.430**
LIC		0.012ns	0.123**	0.097**	0.126**	-0.154**	0.012ns	-0.108**	0.081**	0.105**	0.336**	
ANT		0.038ns	-0.094*	-0.114**	-0.065ns	-0.064ns	-0.080ns	-0.017ns	0.032ns	-0.093*	-0.015ns	0.006ns

PTO = produção por planta (kg); PMF = peso médio do fruto por planta; COF = comprimento do fruto; DIF = diâmetro do fruto; SST = sólidos solúveis totais; ACI = acidez; VIT = vitamina C; FIR = firmeza; C+P = peso da casca e da polpa; BET = β -caroteno; LIC = licopeno; e ANT = antocianina. *, ** e ns: significativo nos níveis de probabilidade de 5%, 1% e não significativo, respectivamente, de acordo com o teste t.

3.2 Análises de trilha em três populações segregantes de goiabeira

Na população ‘Paluma’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PR) efeitos diretos em licopeno foram significativos positivos para betacaroteno (0.393) e acidez titulável (0.132), e significativos negativos para sólidos solúveis (-0,131) (Figura 3). O ‘modeling info’ teste chi-quadrado foi significativo ($p < 0,001$). Na população ‘Pedro O Sato’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PSR), efeitos diretos em licopeno foram significativos positivos apenas para betacaroteno (0,273) (Figura 3). O ‘modeling info’ teste chi-quadrado foi significativo ($p < 0,001$). Na população ‘Pedro Sato’ × ‘Paluma’ (PSP) efeitos diretos em licopeno foram significativos positivos para peso médio (0.876), firmeza (0.122), betacaroteno (0.384) e significativos negativos para sólido solúveis (-0.125), vitamina C (-0.099), peso de casca + polpa (-0.768) (Figura 3). O ‘modeling info’ teste chi-quadrado significativo ($p < 0,001$). Na análise conjunta de todas as progênies PR, PSR e PSP, efeitos diretos em licopeno foram significativos positivos para a relação firmeza (0.097) e betacaroteno (0.323) e significativos negativos para sólidos solúveis (-0.140) (Figura 3). O ‘modeling info’ teste chi-quadrado foi significativo ($p < 0,001$).

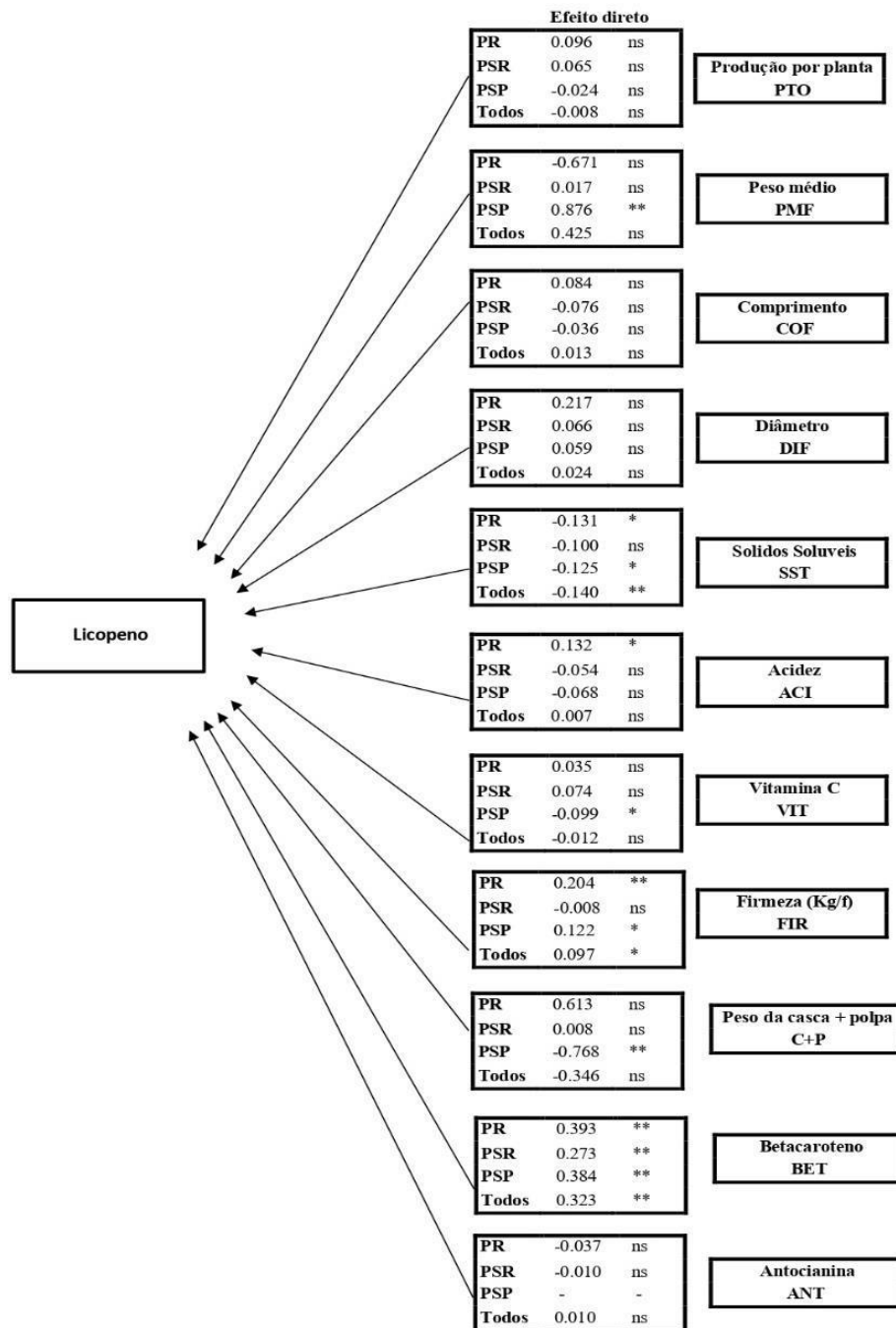


Figura 3. Diagrama causal apresentando estimativas dos efeitos diretos para 11 variáveis independentes/exógenas para a variável dependente/endógena vitamina C em progênies dos cruzamentos de goiabeira ‘Paluma’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PR), ‘Pedro Sato’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PSR), ‘Pedro Sato’ × ‘Paluma’ (PSP) e todas as progênies PR, PSR e PSP. **, *, ns = significativo a 1%, 5% e não-significativo pelo teste-t (n-2 graus de liberdade).

Na população ‘Paluma’ × ‘Goiabeira Roxa’ (PR) efeitos diretos em antocianina foram significativos positivos para peso de casca e polpa (2.025), betacaroteno (0.152), e

significativos negativos para peso medio (-2.332) (Figura 4). O ‘modeling info’ teste chi-quadrado foi significativo ($p < 0,001$). Na população ‘Pedro Sato’ $\times$ ‘Goiabeira Roxa’ (PSR) todos os efeitos para antocianina foram não significativos (Figura 4). Na análise conjunta de todas as progênes PR e PSR, todos os efeitos para antocianina foram são significativos (Figura 4) O ‘modeling info’ teste chi-quadrado foi significativo ($p < 0,001$).

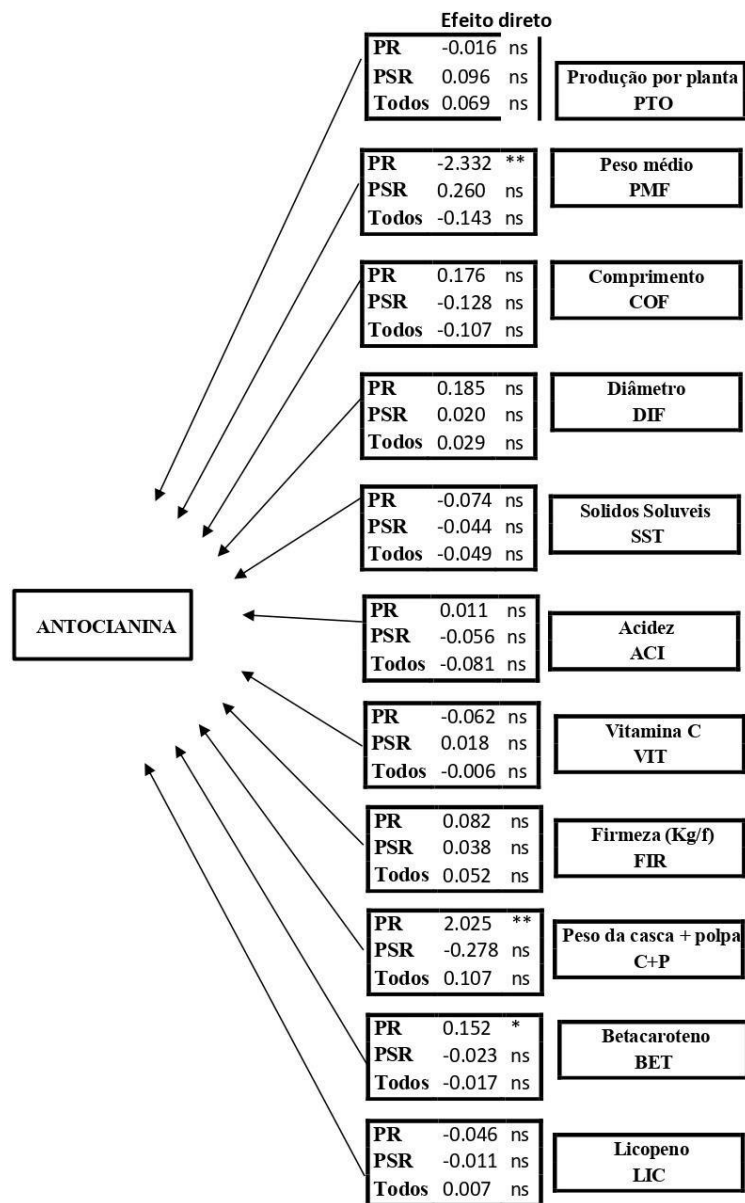


Figura 4. Diagrama causal apresentando estimativas dos efeitos diretos para 11 variáveis independentes/exógenas para a variável dependente/endógena Antocianina em progênes dos cruzamentos de goiabeira ‘Paluma’ $\times$ ‘Goiabeira Roxa’ (PR) e ‘Pedro Sato’ $\times$ ‘Goiabeira Roxa’ (PSR) e todas as progênes PR e PSR. **, *, ns = significativo a 1%, 5% e não-significativo pelo teste-t (n-2 graus de liberdade).

4 DISCUSSÃO

O licopeno e a antocianina são compostos bioativos presentes em diferentes genótipos de goiabeira, com reconhecida importância para a saúde humana, principalmente devido às suas propriedades antioxidantes, entre outras funções fisiológicas. Estudos voltados ao aumento simultâneo desses dois compostos por seleção genética são ainda escassos em fruteiras e, em particular, em goiabeira. Neste contexto, a utilização de análises de correlação e, sobretudo, de análise de trilha representa uma abordagem pioneira para este grupo de plantas. Essas ferramentas estatísticas podem também auxiliar na seleção indireta, permitindo escolher caracteres de mais fácil mensuração e menor custo como preditores de compostos bioativos de interesse.

A correlação positiva e consistente entre licopeno e β -caroteno, observada tanto na análise conjunta ($r = 0,336$) quanto na população PSP ($r = 0,430$), reflete o padrão biossintético previamente descrito para cultivares de goiaba com polpa vermelha, em que os dois carotenoides tendem a se acumular simultaneamente (MERCADANTE, 1999; CORRÊA et al., 2011). Evidências químicas indicam que genótipos com polpa rosada ou vermelha apresentam teores elevados de licopeno e β -caroteno, reforçando a associação identificada (SOLOVCHENKO et al., 2019).

Correlação negativa foi observada entre o teor de licopeno e os sólidos solúveis totais ($r = -0,154$), bem como entre licopeno e vitamina C ($r = -0,108$). Esses resultados apontam para uma possível separação metabólica entre compostos lipofílicos e hidrossolúveis, padrão já relatado em estudos metabolômicos com goiaba e outras frutas carotenogênicas (EMAM et al., 2024). Em síntese, tais associações sugerem que aumentos na concentração de carotenoides podem ocorrer simultaneamente à redução de sólidos solúveis e de ácido ascórbico.

Por outro lado, Mishra e Nandi (2018), ao investigarem genótipos de tomate, identificaram efeitos diretos e positivos dos sólidos solúveis totais sobre a vitamina C, além de influência positiva do ácido ascórbico sobre o acúmulo de sólidos solúveis. Relação semelhante foi verificada na goiaba nos três cruzamentos avaliados, indicando que a interação entre esses metabólitos pode ser dependente da espécie e da composição genética das populações analisadas.

A análise de trilha revelou que o β -caroteno exerce efeito direto positivo sobre o licopeno em praticamente todas as populações estudadas, confirmando a dependência biossintética desses carotenoides (MERCADANTE, 1999; BRITO et al., 2019). Dessa forma,

o β -caroteno pode ser utilizado como marcador fenotípico em programas de seleção indireta visando aumento do licopeno.

No caso da antocianina, foram observadas correlações negativas para sólidos solúveis, vitamina C, peso de casca + polpa e comprimento do fruto ($r = -0,112$) que foi significativo, coerentes com o modelo de competição metabólica entre vias primárias e secundárias. A literatura aponta que a via fenilpropanoide, responsável pela síntese de flavonoides e antocianinas, pode competir por precursores com a síntese de açúcares e ácido ascórbico (TAIZ et al., 2017). Assim, variações, sólidos solúveis totais ou vitamina C (CORRÊA et al., 2011).

Na população PSP, o efeito direto positivo do peso médio do fruto (0,876) e o efeito direto negativo do peso da casca + polpa ($-0,768$) sugerem que a composição estrutural do fruto influencia a concentração de pigmentos, observação que já havia sido destacada em estudos de quantificação de carotenoides em goiaba (CORRÊA et al., 2011).

As diferenças entre populações, como a baixa associação entre pigmentos e caracteres produtivos na PSR versus relações mais expressivas na PSP, evidenciam ampla variabilidade genética, oferecendo oportunidades valiosas para o melhoramento. Pesquisas com germoplasma de goiaba demonstram diversidade significativa no conteúdo de compostos bioativos entre acessos e cruzamentos, apontando para boas perspectivas na seleção de genótipos superiores (CORRÊA et al., 2011; EMAM et al., 2024).

5 CONCLUSÃO

As análises de correlação e de trilha realizadas nas populações de goiabeira revelaram associações distintas entre pigmentos e características agronômicas. O licopeno apresentou correlação positiva com o β -caroteno e, em determinados cruzamentos, com atributos produtivos, como peso e diâmetro do fruto, enquanto sólidos solúveis e vitamina C mostraram efeitos potencialmente negativos sobre sua concentração. Por sua vez, as antocianinas evidenciaram correlações negativas com tamanho, peso da polpa e casca, sólidos solúveis e vitamina C.

O β -caroteno destacou-se como preditor direto do licopeno, sugerindo seu potencial como marcador fenotípico confiável em programas de melhoramento genético.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, F. C. Determinação de vitamina C e atividade antioxidante de frutas nativas do Brasil. **Revista da Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa** – Congrega Urcamp, 2019.
- Belwal, T., Pandey, A., Bhatt, ID et al. Tendências de acúmulo de polifenóis e antocianinas ao longo dos estágios de maturação de frutos silvestres comestíveis da região do Himalaia indiano. **International Journal of Scientific Reports** , 5894 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42270-2>
- BRITO, S. K. A. et al. Lycopene-rich extract from red guava (*Psidium guajava* L.) decreases plasma triglycerides and improves oxidative stress biomarkers on experimentally-induced dyslipidemia in hamsters. **Nutrients**, v. 11, n. 2, p. 393, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nu11020393>
- CASEIRO M, et al. (2020) Lycopene in human health. **LWT**, 127. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109323>.
- CORREA L. C., et al. 2011. Antioxidant content in guava (*Psidium guajava*) and Brazilian guava (*Psidium* spp.) germplasm from different Brazilian regions. **Plant Genetic Resources**, 9: 384-391. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S1479262111000025>
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. **Volume 2. 3.^a ed.** Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa – Editora UFV, 2014. 668 p. ISBN 978-85-7269-515-2
- EMAM, Y. et al. Metabolomics in guava: a comprehensive review of quality-related metabolites. **Scientia Horticulturae**, 2024.
- FRAGA, L. N. et al. Teor de vitamina C e atividade antioxidante da goiaba oriunda de Canindé do São Francisco–SE. Congresso Internacional de Atividade Física, Nutrição e Saúde, v. 1, n. 1, 2017.
- FULEKI T, FRANCIS FJ (1968) Quantitative Methods for Anthocyanins. II. Determination of Total Anthocyanin and Degradation Index for Cranberry Juice. **Journal of Food Science**, 33: 78-83. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1968.tb00888.x>
- KAPOOR, L. et al. Amadurecimento de frutos: dinâmica e análise integrada de carotenoides e antocianinas. **BMC Plant Biology** 22 , 27 (2022). <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03411-w>
- KHERWAR, D., USHA, K. Estudos de variação genética, associação de caracteres e análise de trilhas em goiaba (*Psidium guajava* L.) para atributos bioativos e antioxidantes. **Indian journal of plant physiology** 21 , 355–361 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40502-016-0230-7>

- MISHRA, A.; NANDI, A. Correlation and path coefficient analysis for quality traits in tomato (*Solanum lycopersicon L.*). **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 7, n. 1, p. 1733-1738, 2018.
- MERCADANTE, A. Z. Carotenoids from guava (*Psidium guajava L.*): isolation and identification. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 1999.
- MAURYA, P., et al. (2025). O índice de sementes e o conteúdo relativo de pigmentos são a chave para selecionar variedades de goiaba com sementes macias e coloridas. **O Jornal de Ciência Hortícola e Biotecnologia**, 1–12. <https://doi.org/10.1080/14620316.2025.2552323>
- NAGATA M, YAMASHITA I. (1992). Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. **Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi**, 39(10): 925-928. DOI: <https://doi.org/10.3136/nskkk1962.39.925>
- SAS INSTITUTE INC. SAS® OnDemand for Academics. 2025. Cary, NC, USA: **SAS Institute Inc.** Disponível em: <https://welcome.oda.sas.com/>
- SILVA, A. Estudo avaliativo de vitamina C em polpas congeladas de goiaba (*Psidium guajava L.*) comercializada em Santa Quitéria do Maranhão – MA. 2017. Disponível em: <http://www.ufma.br>.
- SOLOVCHENKO, A. et al. Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables. **Cambridge: Woodhead Publishing**, 2019. p. 225–252.
- SOLOVCHENKO, Alexei; YAHIA, Elhadi M.; CHEN, Chunxian. Pigments. In: YAHIA, ELHADI M. (Ed.). Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables. 1. ed. Amsterdam: **Elsevier/Academic Press**, 2019. p. 225-252. DOI:10.1016/B978-0-12-813278-4.00011-7
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- VASCONCELOS A. G, et al. Lycopene rich extract from red guava (*Psidium guajava L.*) displays anti-inflammatory and antioxidant profile by reducing suggestive hallmarks of acute inflammatory response in mice. **Food Research International**, 99: 959-968. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.01.017>
- ZHENG B, et al. (2022) Metabolomics and transcriptomics analyses reveal the potential molecular mechanisms of flavonoids and carotenoids in guava pulp with different colors. **Scientia Horticulturae**, 305. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111384>
- WRIGHT, S. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research**, v. 20, p. 557–585, 1921.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstram que os parâmetros genéticos associados aos pigmentos bioativos variaram entre as populações avaliadas, evidenciando diferenças no potencial de resposta à seleção. As estimativas de herdabilidade em sentido amplo foram, de modo geral, superiores aos coeficientes de repetibilidade, indicando que a variabilidade genética exerce papel predominante na expressão desses caracteres. O licopeno destacou-se como o composto com maior potencial de melhoramento, especialmente na população ‘Paluma’ × ‘Goiaba Roxa’, enquanto os baixos valores de herdabilidade para antocianinas sugerem ganhos genéticos mais restritos nas populações estudadas.

A ocorrência de segregação transgressiva para licopeno e antocianinas reforça a eficiência da hibridação na geração de combinações genéticas superiores. A identificação de progênies com teores elevados desses compostos evidencia a viabilidade da seleção de indivíduos ou clones com maior concentração de pigmentos nutracêuticos, ampliando as perspectivas para o desenvolvimento de cultivares com maior valor funcional e nutricional.

As análises de correlação e de trilha revelaram que as relações entre pigmentos e caracteres agrônômicos não são uniformes, variando conforme o cruzamento avaliado. O licopeno apresentou associação positiva com o β -caroteno e, em algumas populações, com características relacionadas ao tamanho e ao peso dos frutos, indicando possibilidade de ganhos simultâneos em qualidade nutricional e atributos comerciais. Em contrapartida, sólidos solúveis e vitamina C mostraram efeitos negativos sobre a concentração de licopeno, assim como as antocianinas apresentaram associações desfavoráveis com características de tamanho e qualidade físico-química dos frutos.

Dentre os pigmentos avaliados, o β -caroteno apresentou efeito direto e consistente sobre o teor de licopeno, evidenciando seu potencial como indicador fenotípico auxiliar em programas de melhoramento. Os resultados do presente estudo reforçam que a exploração da variabilidade genética presente nas populações de goiabeira, aliada ao uso de parâmetros genéticos e ao estudo das relações entre caracteres, constitui uma estratégia promissora para a seleção de genótipos superiores, contribuindo para o avanço do melhoramento genético da cultura com foco na qualidade nutricional e funcional dos frutos.

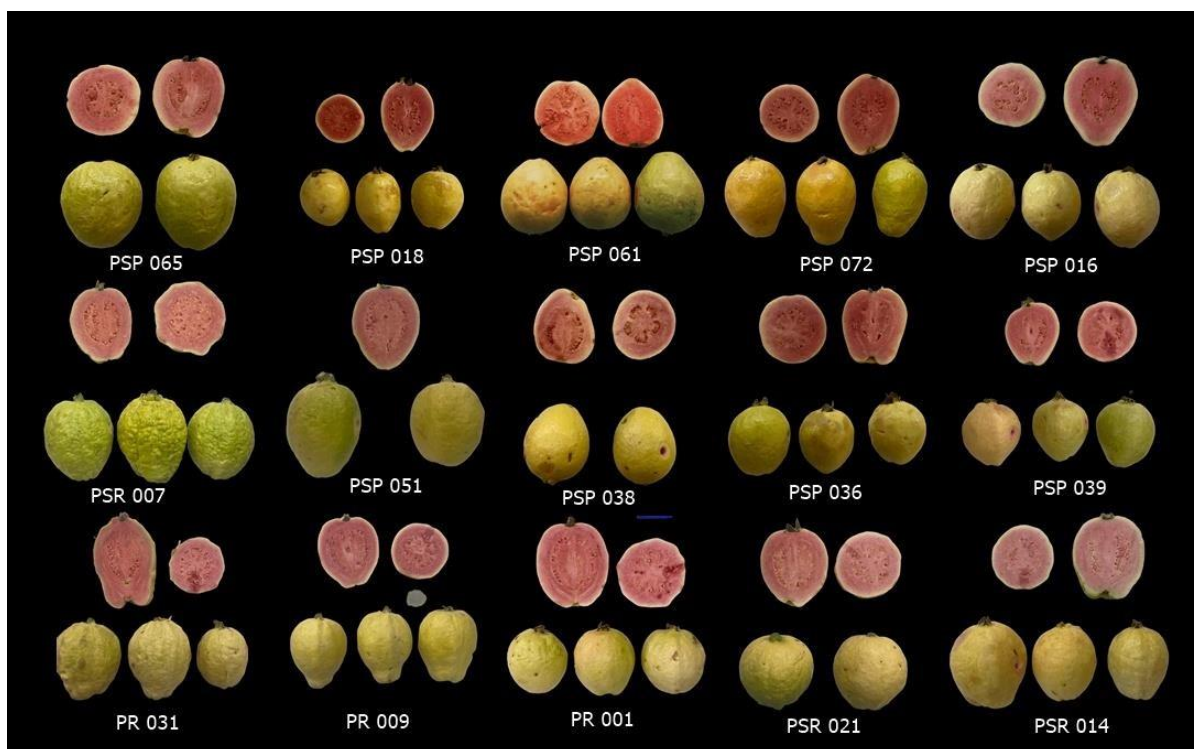
Apesar dos avanços obtidos, algumas limitações devem ser consideradas. A quantificação dos pigmentos foi realizada por métodos espectrofotométricos, os quais, embora amplamente utilizados, podem apresentar menor especificidade quando comparados a técnicas cromatográficas mais precisas. Além disso, as avaliações foram conduzidas em condições

ambientais específicas, o que pode restringir a extrapolação dos resultados para outros ambientes de cultivo. Outro ponto a ser destacado refere-se à ausência de validação molecular dos genótipos, limitando a compreensão mais aprofundada dos mecanismos genéticos associados aos caracteres avaliados.

Dessa forma, estudos futuros podem ser direcionados para a quantificação mais acurada dos pigmentos por meio de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), permitindo a identificação e separação individual dos compostos carotenoides e antocianinas. Adicionalmente, recomenda-se a incorporação de abordagens moleculares, como a utilização de marcadores SNPs e análises de associação genômica ampla (GWAS), visando identificar regiões genômicas associadas aos teores de pigmentos e outros caracteres de interesse. A avaliação dos genótipos em diferentes ambientes e safras também é fundamental para estimar a estabilidade fenotípica e a interação genótipo $\times$ ambiente, fortalecendo as estratégias de seleção no melhoramento genético da goiabeira.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Progênes com os maiores teores médios de licopeno



APÊNDICE B – Progênies com os maiores teores médios de antocianinas

